



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

Departamento de Ingeniería Mecánica

**Aplicación del método shock pulse para
detección de defectos en rodamientos**

INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROYECTO FIN DE CARRERA

Autor: Jaime González Rodríguez
Tutor: Cristina Castejón Sisamón

Quiero aprovechar estas líneas para dar las gracias a todas las personas que han hecho posible este trabajo.

Gracias a mis amigos de clase. Valle, Fernando, Piotr, Jorge y muchos más; porque ha sido genial aprender con vosotros.

Gracias a todos los profesores que han contribuido en mi formación, a mi directora de proyecto Cristina Castejón por su paciencia y ayuda, a José Fernández, a Guillermo Robles, a Elisa Ruiz y a todos los profesores que siempre han estado dispuestos a ayudarme durante estos años en la universidad.

Muchas gracias a Sara (la Water), porque ha sido un gran apoyo este último año y con su alegría me ha hecho mucho más llevadero el tiempo que he invertido en este proyecto.

Y sobre todo mil gracias a mis padres, Concha y Manuel, porque siempre han confiado en mí, porque han sacrificado mucho para que mis hermanos y yo consiguiéramos lo que nos propusiéramos en la vida y porque sin su apoyo habría sido imposible llegar hasta aquí.



INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	9
2.	MARCO TEÓRICO	12
2.1	VIBRACIONES PROCEDENTES DE RODAMIENTOS DEFECTUOSOS	12
2.2	TRANSFORMADA DE FOURIER.....	14
2.2.	FOURIER CON SEÑALES NO ESTACIONARIAS	15
2.3.	STFT.....	17
2.4.	TRANSFORMADA WAVELET.....	18
2.5.	REDUNDANT LIFTING SCHEME: CYCLE SPINNING.....	20
2.5.1.	LIFTING SCHEME	20
2.5.2.	ESQUEMA DE LIFTING REDUNDANTE.....	22
2.5.3.	ESQUEMA DE LIFTING REDUNDANTE MEJORADO.....	23
2.5.3.	CYCLE SPINNING	23
2.6.	TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG	24
2.7	MÉTODO SHOCK PULSE	28
3.	DESARROLLO DEL PROYECTO.....	32
3.1	OBTENCIÓN DE DATOS	32
3.2	NOMENCLATURA UTILIZADA PARA LAS SEÑALES	35
3.3	DETECCIÓN DE DEFECTOS	36
3.4	MÉTODO SHOCK PULSE	38
4.	RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	40
4.1	TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)	40
4.2	TRANSFORMADA DE HILBERT.....	44
4.3	TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG	58
4.4	CYCLE SPINNING	70
5.	APLICACIÓN DEL MÉTODO SHOCK PULSE	82
5.1	TRANSFORMADA DE HILBERT.....	82
5.2	TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG	90
5.3	ESQUEMA DE LIFTING REDUNDANTE.....	93
5.4	CLASIFICACIÓN DEL DEFECTO	99
6.	CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	102
6.1	CONCLUSIONES.....	102
6.1	FUTUROS DESARROLLOS	104
7.	BIBLIOGRAFÍA	105
8.	ANEXOS	107
8.1	ESPECTRO_FREQ.....	107
8.2	TEST_FFT.....	107
8.3	MAXIMOS	107
8.4	HT	108
8.5	TEST_HT	108
8.6	EMD	108
8.7	HHT	108
8.8	TEST_HHT	109
8.9	CYCLE_SPINNING	109
8.10	MEAN_CS	109
8.11	MEAN_CS_TEST	110
8.12	SPM_HILBERT	110
8.13	SPM_HILBERT_TEST	110
8.14	HHT_SPM.....	110



-METODO SHOCK PULSE PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

8.15 TEST_HHT_SPM	110
8.16 HHT_MY_SPM	111
8.17 HHT_MY_SPM_TEST	111
8.18 SPM_CYCLE_SPINNING	111
8.19 SPM_CYCLE_SPINNING_TEST	112
8.20 SPM_CS	112
8.21 SPM_CS_TEST	112
8.22 MAXIMO	112



INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Muestras necesarias para cada velocidad de giro.....	34
Tabla 3-2 Características rodamiento ER10K.....	35
Tabla 3-3 Frecuencias de defecto para cada frecuencia de giro	35
Tabla 4-1 Análisis de frecuencias B-30-50000-3	50
Tabla 4-2 Análisis de frecuencias I-30-50000-5	54
Tabla 4-3 Análisis de frecuencias O-10-50000-1	57
Tabla 4-4 Frecuencias encontradas mediante transformada de Hilbert.....	57
Tabla 4-5 Análisis de frecuencias IMF1 B-10-50000-4.....	62
Tabla 4-6 Análisis de frecuencias IMF1 rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz	64
Tabla 4-7 Análisis de frecuencias IMF1 rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	64
Tabla 4-8 Análisis de frecuencias IMF1 I-10-50000-1	67
Tabla 4-9 Análisis de frecuencias IMF1 I-20-50000-1	67
Tabla 4-10 Análisis de frecuencias IMF1 I-30-50000-2	67
Tabla 4-11 Análisis de frecuencias IMF1 O-10-50000-1.....	69
Tabla 4-12 Análisis de frecuencias IMF1 O-20-50000-1.....	69
Tabla 4-13 Análisis de frecuencias IMF1 O-30-50000-1.....	69
Tabla 4-14 Frecuencias encontradas mediante transformada de Hilbert-Huang.....	70
Tabla 4-15 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz	75
Tabla 4-16 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz	75
Tabla 4-17 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	76
Tabla 4-18 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10 Hz.....	77
Tabla 4-19 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 20 Hz.....	78
Tabla 4-20 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 30 Hz.....	79
Tabla 4-21 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz.....	80
Tabla 4-22 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz.....	80
Tabla 4-23 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz.....	81
Tabla 4-24 Frecuencias encontradas mediante Esquema de Lifting Redundante	81
Tabla 5-1 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	89
Tabla 5-2 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	90
Tabla 5-3 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	92
Tabla 5-4 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	92
Tabla 5-5 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	93
Tabla 5-6 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	93
Tabla 5-7 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	97
Tabla 5-8 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	97
Tabla 5-9 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	98
Tabla 5-10 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	98
Tabla 5-11 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	99
Tabla 5-12 Resultados aplicando el SPM mejorado.....	99
Tabla 5-13 clasificación del defecto: transformada de Hilbert.....	101



-METODO SHOCK PULSE PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Tabla 5-14 clasificación del defecto: transformada de Hilbert-Huang.....	101
Tabla 5-15 clasificación del defecto: cycle spinning.....	101



INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Esquema del desarrollo del proyecto	11
Figura 2-1 Análisis tiempo frecuencia de varias señales [11]	15
Figura 2-2 Señal suma de cosenos de frecuencias 10, 25, 50 y 100Hz	16
Figura 2-3 Señal no estacionaria en la que la frecuencia varía con el tiempo	16
Figura 2-4: Representación de STFT con intervalos temporales pequeños	17
Figura 2-5: Representación de STFT con intervalos temporales grandes	18
Figura 2-6: Algoritmo transformada Wavelet	19
Figura 2-7 Esquema de Lifting	21
Figura 2-8 Esquema de Lifting Redundante	22
Figura 2-9 Esquema del Cycle Spinning [5]	24
Figura 2-10: Shifting process	25
Figura 2-11: Descomposición Modal Empírica de una señal	27
Figura 2-12 Señal no filtrada	30
Figura 2-13 Señal filtrada y amplificada	31
Figura 2-14 Señal analógica	31
Figura 3-1 Máquina simuladora de fallos en rodamientos	33
Figura 3-2 Acelerómetro	33
Figura 3-3 Amplificador	33
Figura 3-4 Tarjeta de adquisición de datos	34
Figura 3-5 Rodamiento ER10K	34
Figura 3-6 Esquema de los programas utilizados en la parte de detección de defectos ..	37
Figura 3-7 Esquema de los programas utilizados para aplicar el método shock pulse ..	39
Figura 4-1 FFT Rodamiento sin defecto girando a 10, 20 y 30 Hz	41
Figura 4-2 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 10 Hz	41
Figura 4-3 FFT Rodamiento con defecto en bola girando a 10, 20 y 30 Hz	42
Figura 4-4 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz	42
Figura 4-5 FFT Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10, 20 y 30 Hz ..	43
Figura 4-6 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en la pista interna a 10 Hz	43
Figura 4-7 FFT Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10, 20 y 30 Hz ..	44
Figura 4-8 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en la pista externa a 10 Hz	44
Figura 4-9 Hilbert Rodamiento sin defecto girando a 10, 20 y 30 Hz	45
Figura 4-10 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 10, 20 y 30 Hz	46
Figura 4-11 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz	47
Figura 4-12 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz	47
Figura 4-13 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	48
Figura 4-14 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	49
Figura 4-15 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	49
Figura 4-16 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	50
Figura 4-17 Hilbert Rodamiento con defecto en pista interna girando a 10, 20 y 30 Hz ..	52
Figura 4-18 Hilbert Señal I-30-50000-4	52
Figura 4-19 Hilbert Señal I-30-50000-5	53
Figura 4-20 Detalle Hilbert I-30-50000-5	53
Figura 4-21 Hilbert Rodamiento con defecto en pista externa girando a 10, 20 y 30 Hz	55



Figura 4-22 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz	55
Figura 4-23 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz	56
Figura 4-24 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz	56
Figura 4-25 Detalle de la primera IMF para un rodamiento sin defecto girando a 10 Hz	58
Figura 4-26 Transformada de Hilbert-Huang de las IMF de un rodamiento a 10 Hz	59
Figura 4-27 Detalle de las 3 primeras IMF de la señal A-30-5000-1	60
Figura 4-28 Detalle de las 5 primeras IMF de la señal A-30-50000-1	60
Figura 4-29 Detalle de las 5 primeras IMF para un rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz	61
Figura 4-30 Detalle de las 5 primeras IMF de la señal B-10-50000-3	62
Figura 4-31 Detalle de las 5 primeras IMF de la señal B-10-50000-4	62
Figura 4-32 Detalle de las 5 primeras IMF para un rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz	63
Figura 4-33 Detalle de las 5 primeras IMF para un rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz	64
Figura 4-34 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz	65
Figura 4-35 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista interna girando a 20 Hz	66
Figura 4-36 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista interna girando a 30 Hz	66
Figura 4-37 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista externa a 10 Hz	68
Figura 4-38 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista externa a 20 Hz	68
Figura 4-39 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista externa a 30 Hz	69
Figura 4-40 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz, señal de 5000 muestras ...	71
Figura 4-41 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz, señal de 50000 muestras .	71
Figura 4-42 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz, señal de 5000 muestras ...	72
Figura 4-43 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz, señal de 50000 muestras .	72
Figura 4-44 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz, señal de 5000 muestras ...	73
Figura 4-45 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz, señal de 50000 muestras .	73
Figura 4-46 RLS, Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz.....	74
Figura 4-47 RLS, Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz.....	75
Figura 4-48 RLS, Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz.....	76
Figura 4-49 RLS, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10 Hz	77
Figura 4-50 RLS, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 20 Hz	78
Figura 4-51 RLS, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 30 Hz	78
Figura 4-52 RLS, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz	79
Figura 4-53 RLS, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz	80
Figura 4-54 RLS, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz	81
Figura 5-1 Diagrama de flujo para el método <i>shock pulse</i>	82
Figura 5-2 Hilbert-SPM, Rodamiento sin defecto	83
Figura 5-3 Hilbert-SPM, Rodamiento con defecto en bola	84
Figura 5-4 Hilbert-SPM, Rodamiento con defecto en la pista interna	84



Figura 5-5 Hilbert-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa.....	85
Figura 5-6 Amplitud vS Velocidad de giro	86
Figura 5-7 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento sin defecto.....	87
Figura 5-8 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento con defecto en bola.....	88
Figura 5-9 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento con defecto en la pista interna	88
Figura 5-10 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa.....	89
Figura 5-11 HHT-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz .	90
Figura 5-12 HHT-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz .	91
Figura 5-13 HHT-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz .	91
Figura 5-14 RLS-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz ..	94
Figura 5-15 RLS-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz ..	94
Figura 5-16 RLS-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz ..	95
Figura 5-17 RLS-SPM Mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz	96
Figura 5-18 RLS-SPM Mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz	96
Figura 5-19 RLS-SPM Mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz	97
Figura 5-20 Diagrama de flujo para el método Shock pulse	100



1. INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de los componentes de máquinas ha sido uno de los campos más importantes de la ingeniería mecánica a lo largo de su historia, la correcta evaluación del estado dinámico de dichos componentes es el elemento clave para un correcto plan de mantenimiento y en este campo es en el que se encuadra este proyecto.

Habitualmente se clasifican los tipos de mantenimiento de la siguiente manera:

- Mantenimiento correctivo es aquel en el que se sustituyen las piezas en el momento en el que éstas fallan.
- Mantenimiento preventivo es aquel en el que se sustituyen las piezas cada cierto tiempo, independientemente de que éstas estén o no dañadas, la principal ventaja de este mantenimiento frente al correctivo es que se evitan paradas imprevistas y con ello pérdidas por paradas de producción, la principal desventaja es que en muchas ocasiones se desperdician piezas que podrían haber seguido funcionando durante más tiempo.
- Mantenimiento predictivo es aquel en el que se realizan ciertas medidas para determinar cuando un elemento va a fallar y, en el momento en el que sea necesario, programar una parada para su sustitución.

En los últimos años se está tendiendo cada vez más a un mantenimiento predictivo, ya que aúna las ventajas de los otros dos tipos de mantenimiento, no se desperdician piezas cuyo funcionamiento es correcto y se pueden programar las paradas para disminuir la repercusión de éstas.

Es bien sabido que la mayoría de máquinas en la industria se diseñan con el fin de que el primer elemento que falle sean los rodamientos, ya que son elementos fácilmente sustituibles y de bajo coste. Por lo tanto resulta de vital importancia conocer, no sólo cuando su funcionamiento no es el adecuado sino además donde se localiza el defecto, para así poder evaluar con la mayor precisión posible la gravedad de la avería y programar la sustitución de estos elementos.



En el pasado los operarios evaluaban el funcionamiento de las máquinas a partir del sonido que éstas emitían, a partir de este hecho surge la idea de estudiar las vibraciones emitidas por las máquinas para evaluar el correcto funcionamiento de los rodamientos.

Cuando queremos estudiar señales de vibración lo primero que se viene a la cabeza es la aplicación de la transformada de Fourier, pero con el paso de los años modernas técnicas han ido desplazando este tipo de análisis que presupone que no existe dependencia alguna entre el espectro de frecuencias y el tiempo, hecho que como podremos comprobar posteriormente es completamente falso.

1.1 OBJETIVO DEL PROYECTO

Este proyecto se encuentra en el marco del mantenimiento predictivo y pretende comparar diferentes métodos para tratamiento de señales de vibración procedentes de rodamientos con distintos tipos de fallo, empezando por la conocida transformada de Fourier, para pasar después a métodos que permitan el tratamiento de señales no estacionarias como son la transformada de *Hilbert-Huang* o el *redundant lifting scheme* combinado con la transformada de Hilbert. Se pretende combinar estos métodos de tratamiento de señales con el método *shock-pulse*, técnica que permite determinar a partir de un único valor el estado de los rodamientos sin necesidad de interpretaciones más profundas de los resultados.

1.2 DESCRIPCIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

En el proyecto se va a trabajar con señales de vibración obtenidas mediante el uso de acelerómetros en una máquina situada en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.

La obtención de dichas señales no forma parte del proyecto como tal, ya que fueron obtenidas en el desarrollo de un trabajo dirigido realizado por Iván Martínez Aldana [1].

Disponemos de 4 tipos de rodamiento: rodamientos sin fallo, rodamientos con fallo en bola, rodamientos con fallo en la pista interna y rodamientos con fallo en la pista externa.

Cada rodamiento se ha ensayado a 3 velocidades de giro diferentes: 10 Hz, 20 Hz y 30 Hz.



-METODO SHOCK PULSE PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

Se realizaron ensayos tomando 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 y 50000 muestras.

Para cada combinación tipo de rodamiento, velocidad de giro y número de muestras se realizaron 5 medidas, de modo que al final disponemos de 360 medidas.

Una vez tenemos las señales el proyecto queda dividido en dos partes, en la primera de ellas se va a estudiar el espectro de frecuencias aplicando diferentes técnicas de filtrado con el objetivo de determinar qué métodos son adecuados para extraer las frecuencias de defecto. Los métodos utilizados serán: “*Transformada de Fourier*”, “*Transformada de Hilbert*”, “*Transformada de Hilbert-Huang*” y “*Transformada Wavelet*” mediante la aplicación del algoritmo conocido como “*cycle-spinning*”.

En la segunda parte se va a combinar aquellos métodos que consideremos suficientemente buenos con el método *Shock pulse* aplicando la ecuación dada en [3]. Posteriormente se comprobó que dicha ecuación no compensa las variaciones en la velocidad de giro, de modo que se obtuvo una nueva ecuación para cada método de manera que nuestros resultados fueran estables independientemente de la velocidad de giro del motor.

En el esquema de la figura 1-1 puede verse un resumen del desarrollo del proyecto.

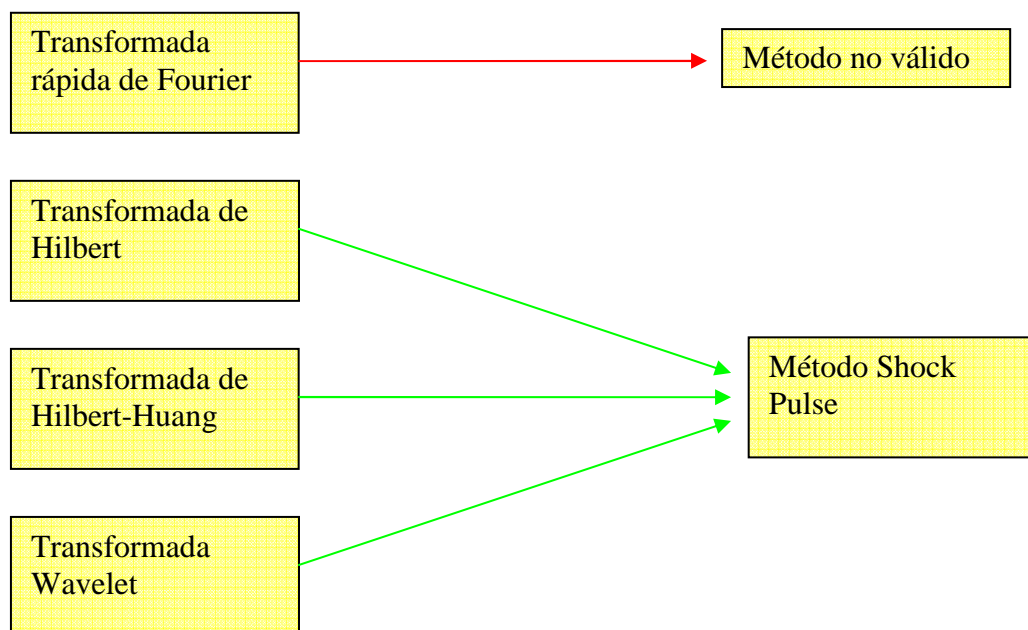


Figura 1-1 Esquema del desarrollo del proyecto

2. MARCO TEÓRICO

2.1 VIBRACIONES PROCEDENTES DE RODAMIENTOS DEFECTUOSOS

El hecho de que la distribución de cargas varíe conforme los elementos rodantes ruedan sobre los anillos causa que los rodamientos se comporten como generadores de vibraciones, incluso aunque éstos no tengan ningún defecto. Sin embargo, la presencia de defectos hace que ciertas frecuencias se amplifiquen. Los defectos pueden clasificarse como localizados y distribuidos [2]:

- **DEFECTOS LOCALIZADOS**

El tipo más común son las grietas en las pistas o en los elementos rodantes, principalmente causados por propagación de fisuras hacia la superficie por fatiga. El fallo por fatiga se ve favorecido cuando el rodamiento está sobrecargado o soporta cargas de impacto durante su funcionamiento o instalación.

- **DEFECTOS DISTRIBUIDOS**

Entre otros, podemos encontrar la rugosidad superficial, pistas desalineadas y elementos rodantes desiguales. Estos defectos suelen deberse a errores de fabricación y a una inadecuada instalación. La variación de las fuerzas de contacto entre los elementos rodantes y las pistas causa un incremento en el nivel de vibración.

Una vez aparece una fisura, esta evoluciona de la siguiente manera.

El primer síntoma que aparece cuando el fallo está en un estado incipiente es una vibración con componentes de alta frecuencia (habitualmente superiores a 5KHz), en este estado no se suele sustituir los rodamientos.

En un segundo estado, la grieta comienza a ser visible y el rodamiento produce un sonido audible y en algunos casos la temperatura aumenta. En este estado aparecen componentes espectrales en un rango de frecuencias bajas e intermedias (menos de 5 KHz), estas frecuencias suelen llamarse frecuencias características de defecto, en este estado debe programarse el cambio de los rodamientos. Las frecuencias características de defecto pueden clasificarse en función de donde se produce el defecto [4]:

- FTF (Fundamental train frequency)- es la frecuencia de rotación de la jaula que contiene los elementos rodantes.

$$FTF = \frac{F_s}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right) \quad (2.1)$$

- BPFI (Ball pass frequency of the inner race)- Es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista interna.

$$BPFI = F_s \frac{N_b}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right) \quad (2.2)$$

- BPFO (Ball pass frequency of the outer race)- es la frecuencia de paso de los elementos rodantes por un defecto en la pista externa.

$$BPFO = F_s \frac{N_b}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cos \phi \right) \quad (2.3)$$

- BSF (Ball spin frequency)- Es la frecuencia de giro de los elementos rodantes

$$BSF = F_s \frac{P_b}{2B_d} \left(1 - \frac{B_d^2}{P_d^2} \cos^2 \phi \right) \quad (2.4)$$

Donde:

$$\begin{cases} F_s = \text{Frecuencia de giro del rodamiento} \\ P_d = \text{Diámetro medio del rodamiento} \\ B_d = \text{Diámetro de las bolas} \\ N_b = \text{Número de bolas} \\ \phi = \text{Ángulo de contacto} \end{cases}$$

En un tercer estado, cerca de la rotura catastrófica del elemento, el ruido aumenta significativamente y debe apreciarse un incremento en la temperatura, las bajas frecuencias empiezan a amplificarse y la sustitución del rodamiento debe hacerse de inmediato [2].

En señales reales resulta casi imposible determinar las frecuencias que la componen mediante su representación temporal, por lo que se hace necesario un nuevo enfoque, el estudio en frecuencia. Para obtener el espectro en frecuencias se utilizan diferentes técnicas. La más conocida es la transformada de Fourier. A continuación se muestra un resumen de los principales métodos utilizados para dicho fin.

2.2 TRANSFORMADA DE FOURIER

La teoría de Fourier se basa en la idea de que cualquier señal periódica puede descomponerse en una suma de senos. Esta suma de senos se denomina serie de Fourier, la descomposición en serie de Fourier de una señal cualquiera facilita en gran medida su análisis y es una técnica muy utilizada en el tratamiento de señales.

Cuando la señal es una función no periódica no podemos aplicar el desarrollo en serie de Fourier, aquí entra en escena la transformada de Fourier. Es evidente que cualquier función no periódica puede tratarse como una función periódica de periodo infinito, es en esta idea donde se sustenta la teoría de la transformada de Fourier, que nos permitirá descomponer nuestra señal en una suma de senos con diferentes frecuencias. Con la transformada de Fourier podemos pasar del dominio temporal al dominio en frecuencia y viceversa, mediante las ecuaciones 2.5 y 2.6.

$$\hat{s}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.5)$$

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{s}(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.6)$$

De esta manera disponemos de dos formas diferentes de representar las señales, en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia. Ambas representaciones disponen de la misma información sobre la señal, siendo los enfoques completamente diferentes.

En la figura 2-1 se muestran ambas representaciones para distintas señales. Las dos primeras señales son dos senos, la frecuencia del segundo es superior a la del primero, como se puede observar en el análisis en frecuencia. La tercera señal es la suma de las dos primeras y tras aplicar la transformada de Fourier se observan las frecuencias de ambos armónicos, cuando tratamos con señales más complicadas compuestas por una gran cantidad de armónicos, el análisis en el dominio de la frecuencia nos permite distinguir las frecuencias de los armónicos principales, labor que sería casi imposible si sólo dispusiéramos del análisis temporal.

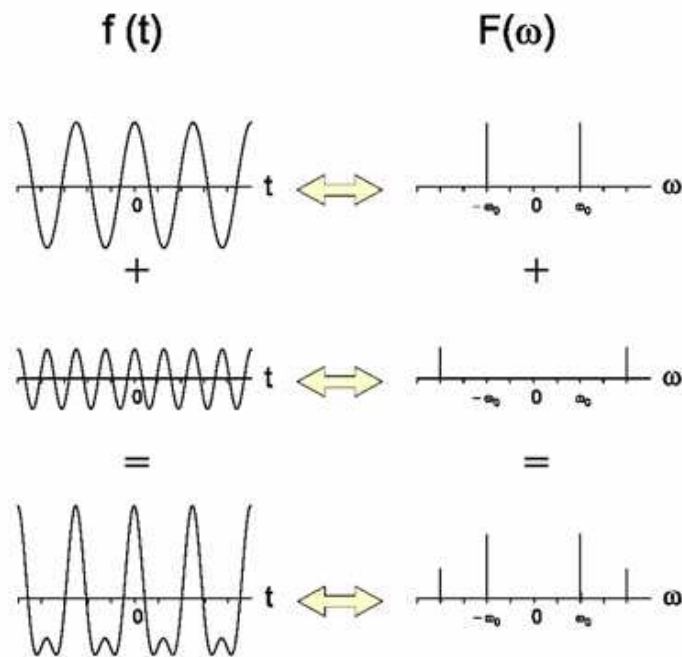


Figura 2-1 Análisis tiempo frecuencia de varias señales [11]

2.2. FOURIER CON SEÑALES NO ESTACIONARIAS

Ya hemos visto que se puede enfocar al análisis de la señal de vibración desde dos puntos de vista complementarios, la frecuencia y el tiempo. Ahora se plantea un problema existente en casi todas las señales físicas. ¿Qué pasa si nuestro espectro en frecuencias no es el mismo para diferentes instantes de tiempo?

En este caso nos encontraríamos ante el dilema de que existirían infinitos espectros de frecuencias para una única representación temporal. De modo que si representamos la señal en el dominio del tiempo no tenemos información sobre la frecuencia y si localizamos la señal en el dominio de la frecuencia perdemos por completo la información temporal. Puede llegar a darse el caso de las figuras 2-2 y 2-3 en las que se tienen dos señales completamente diferentes con la misma representación en el dominio de la frecuencia. [12]

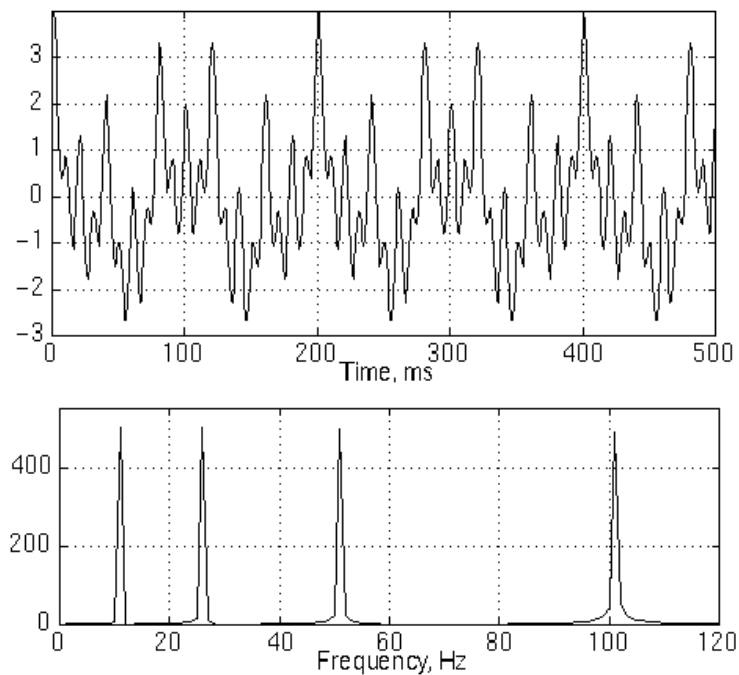


Figura 2-2 Señal suma de cosenos de frecuencias 10, 25, 50 y 100Hz

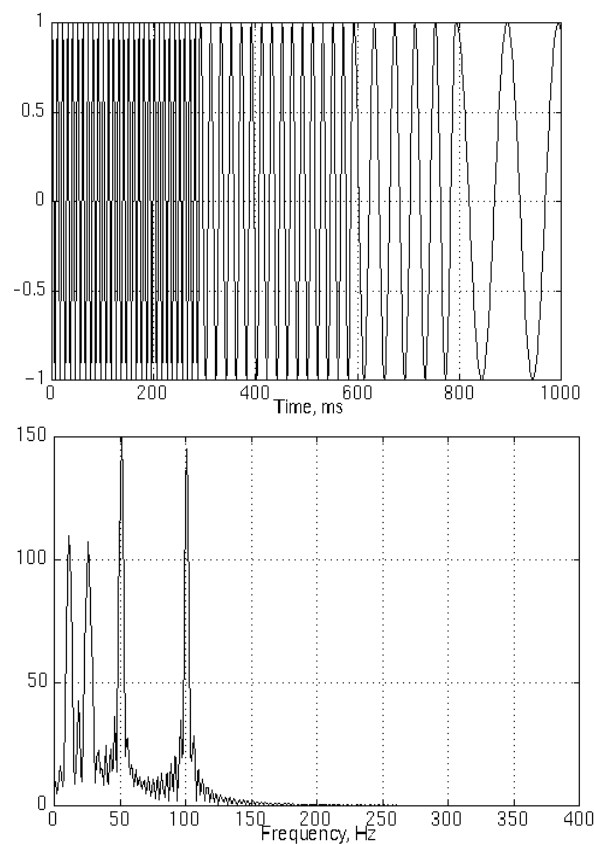


Figura 2-3 Señal no estacionaria en la que la frecuencia varía con el tiempo

2.3. STFT

La primera idea que surge al respecto es dividir el dominio temporal en un número finito de intervalos de manera que podamos tratar cada uno de esos intervalos como estacionario y aplicar ahí la transformada de Fourier, de esta manera podríamos representar las frecuencias existentes en cada uno de los instantes temporales. Esta forma de abordar el problema es denominada *STFT Short Term Fourier Transform*, y funciona relativamente bien para ciertas señales, pero presenta un problema, es necesario elegir el tamaño del intervalo, si éste tiene una longitud infinita dispondremos de una representación en frecuencia perfecta pero no dispondremos de ninguna información en el tiempo (éste es el caso de la transformada de Fourier), como podemos ver en las figuras 2-4 y 2-5 conforme el intervalo se hace menor se obtiene información en el dominio temporal a costa de perder información en frecuencia, llegando al punto de no conocer frecuencias concretas presentes en la señal sino bandas de frecuencia. Este hecho se debe al principio de incertidumbre, dicho principio fue formulado en primera instancia por Heisenberg, que lo enunció de la siguiente manera: *La cantidad de movimiento y la posición de una determinada partícula no pueden ser determinadas simultáneamente*. Este principio puede aplicarse a ciertas parejas de variables físicas, aplicado a nuestro tema llegamos a la conclusión de que no puede determinarse con exactitud en un cierto punto la información temporal y en frecuencia [12].

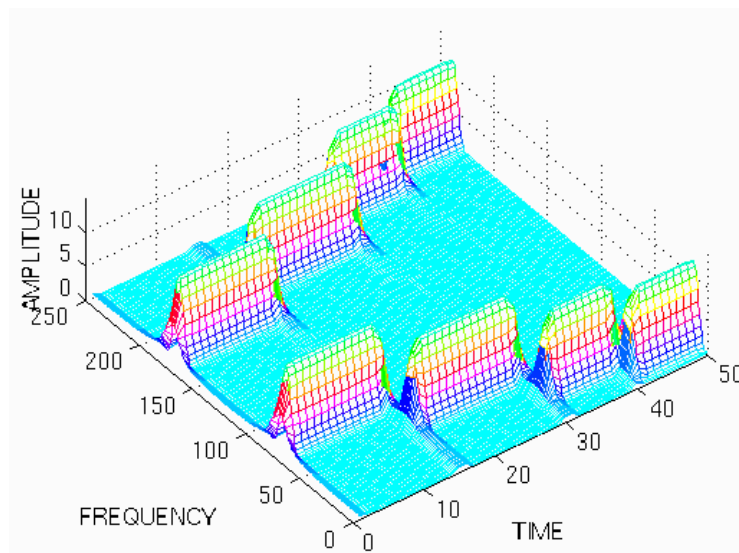


Figura 2-4: Representación de STFT con intervalos temporales pequeños

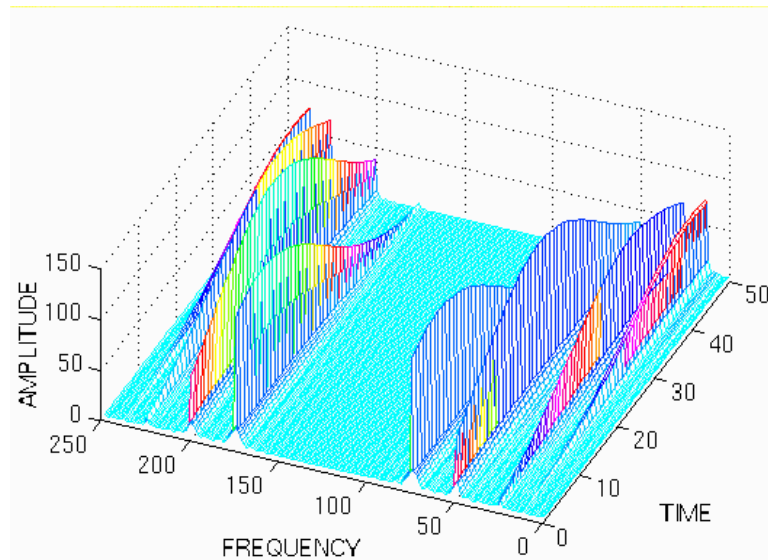


Figura 2-5: Representación de STFT con intervalos temporales grandes

2.4. TRANSFORMADA WAVELET

Dado el principio de incertidumbre, lo mejor que podemos hacer es determinar las componentes espectrales existentes en un determinado intervalo temporal. La bondad de los resultados obtenidos depende de la resolución empleada en el análisis, en el caso de la STFT tenemos una resolución fija para todos los tiempos, es por esto por lo que se introduce el concepto de Wavelet, que proporcionará una resolución variable en el tiempo [12].

Dado que en la mayoría de las señales las frecuencias bajas se prolongan en el tiempo a lo largo de todo el dominio y las frecuencias altas suelen ser eventos puntuales, nos interesa caracterizar de una manera correcta la frecuencia de las señales de baja frecuencia y tener una buena resolución temporal para las señales de alta frecuencia, la transformada Wavelet está diseñada para trabajar de esta manera [12].

En la figura 2-6 se resume el algoritmo seguido en la transformada Wavelet discreta, la idea es utilizar varios filtros paso alto y paso bajo, de modo que en primer lugar dividamos el número de datos en dos, la mitad frecuencias altas la mitad frecuencias bajas, seguimos dividiendo las frecuencias bajas varias veces hasta llegar a un número prefijado de iteraciones, en los niveles más bajos, en los que se encuentran las frecuencias más bajas, tendremos un pequeño número de muestras con lo que la resolución temporal será mala y un pequeño abanico de frecuencias con lo que la resolución en frecuencia será mucho mejor, ocurre exactamente al contrario con los niveles más altos.

Resumiendo, la transformada wavelet se diseña de manera que las frecuencias altas tengan mejor resolución en el tiempo porque disponemos de un mayor número de muestras para el mismo espacio de tiempo, por otro lado, las frecuencias más bajas se intentan caracterizar correctamente en frecuencia aun a costa de perder información temporal.

Últimamente está cobrando cada vez más importancia la conocida como Transformada Wavelet Packages, que sigue el mismo algoritmo pero se conserva no sólo la información de los filtros paso bajo sino también la de los filtros paso alto, de modo que el zoom se hace para todo el espectro de frecuencias [12].

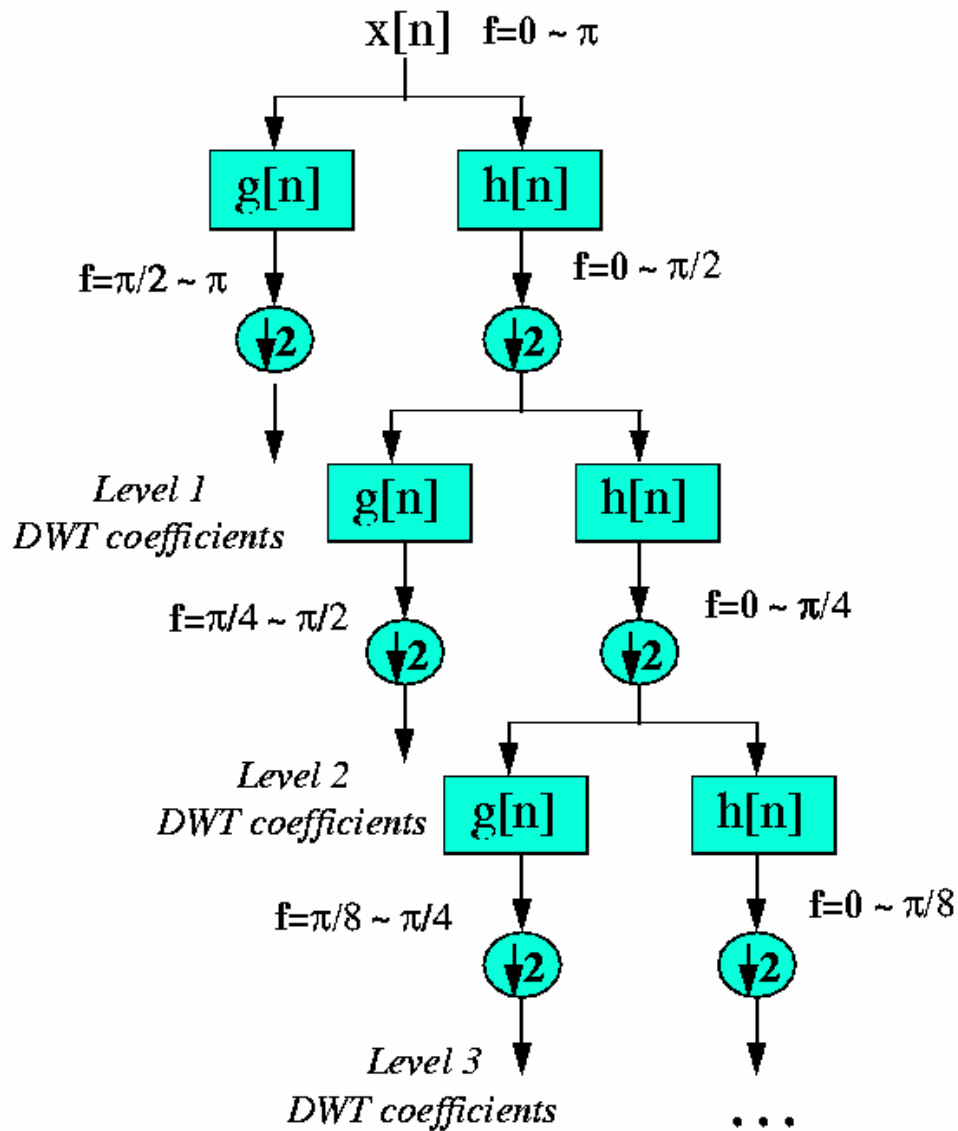


Figura 2-6: Algoritmo transformada Wavelet

2.5. REDUNDANT LIFTING SCHEME: CYCLE SPINNING

2.5.1. LIFTING SCHEME

El esquema de *lifting* es una técnica introducida en 1996 por W.Sweldens para generar wavelets biortogonales. Se compone de tres pasos que pueden verse en la figura 2-7 [7]:

- Split step → Se divide la señal $x = (x_i)_{i \in \mathbb{Z}}$ en muestras pares $S^0 = (S_i^0)_{i \in \mathbb{Z}}$ e impares $d^0 = (d_i^0)_{i \in \mathbb{Z}}$, siendo:

$$\begin{cases} S_i^0 = X_{2i} \\ d_i^0 = X_{2i+1} \end{cases} \quad (2.7)$$

- Prediction step → Se predicen los valores de d^0 aplicando un operador P, llamado de predicción, a S^0 ; posteriormente se calcula el error de predicción restando a d^0 el valor obtenido. Al error de predicción d^1 se le denomina como señal de detalle, de manera que queda:

$$d^1 = d^0 - P(S^0) \quad (2.8)$$

- Update step → Se actualiza el valor de las muestras pares utilizando un operador U sobre la señal de detalle d^1 y sumándole el resultado a S^0 :

$$S^1 = S^0 + U(d^1) \quad (2.9)$$

Existen diferentes técnicas para calcular los operadores P y U, de modo que el número de Wavelets distintas que podemos crear es infinito, en nuestro caso para el operador de predicción P vamos a utilizar un operador lineal, esto supone que calcularemos el valor de la muestra impar como la media de los dos valores pares anterior y posterior a ésta. En todos los casos vamos a trabajar con un número de datos igual a una potencia de 2, esto quiere decir que el valor final será impar (recordar que el primer valor es el 0) y que por lo tanto no se encuentra entre dos valores pares a partir de los que se pueda calcular la media, en este caso la predicción se realiza suponiendo que dicho valor está en la recta que une los dos valores anteriores.

Si los puntos son X_n , X_{n-1} y X_{n-2} , y las coordenadas en el eje Y de los tres puntos son equidistantes entre sí, podemos suponer que la recta que une los dos valores anteriores al último es de la forma:

$$\frac{X - X_{n-2}}{X_{n-1} - X_{n-2}} = \frac{Y - 0}{1 - 0} \quad (2.10)$$

Dado que las coordenadas en el eje y son equidistantes, la del punto X_n sería 2 y puede obtenerse su valor directamente:

$$\frac{X_n - X_{n-2}}{X_{n-1} - X_{n-2}} = 2 \Rightarrow X_n = 2X_{n-1} - X_{n-2} \quad (2.11)$$

Para el cálculo del operador U nos apoyamos en el hecho de que la media de la señal de aproximación S debe ser la misma, el resultado es que el valor a sumar será un cuarto de la suma de los dos valores de la señal de detalle que envuelven al correspondiente valor par. Puede encontrarse una completa demostración del resultado obtenido en [13]

$$U_i = \frac{1}{4}(d_i + d_{i-1}) \quad (2.12)$$

El principal problema del esquema de *Lifting* es que no asegura la estabilidad temporal, esto quiere decir que al desplazar la señal de entrada en el tiempo la salida no será la misma desplazada, sino otra completamente distinta. Una solución a este problema es la utilización del esquema de *Lifting* Redundante.

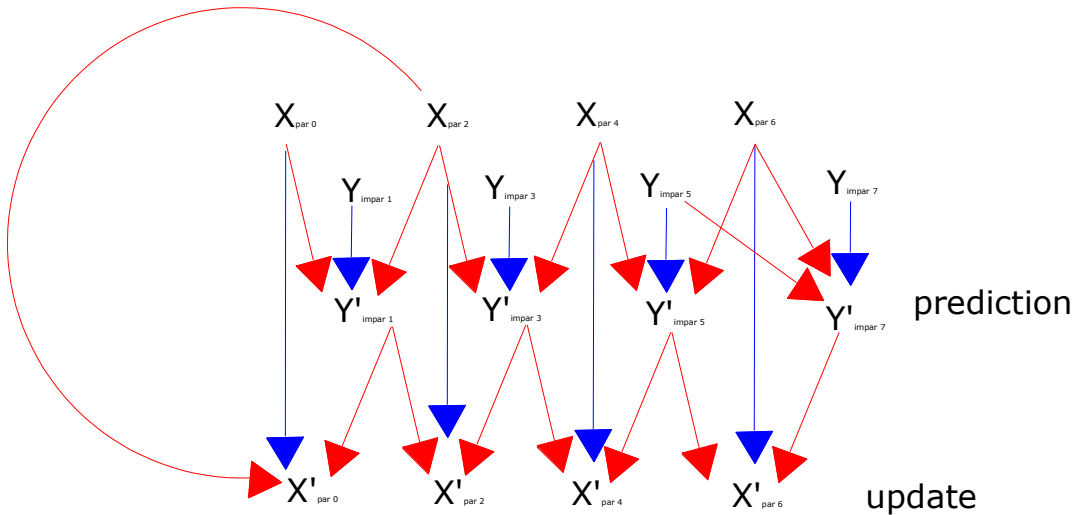


Figura 2-7 Esquema de Lifting

2.5.2. ESQUEMA DE LIFTING REDUNDANTE

En este caso, como puede observarse en la figura 2-8 se elimina el paso de separación o *split step*, no se divide la señal y por lo tanto todas las muestras tendrán el mismo número de datos, para asegurar que el análisis multirresolución sigue siendo consistente hay que completar los operadores P y U con 0 en cada paso, de modo que dichos operadores son adaptativos y varían en cada paso.

Al empezar el proceso se copia la señal inicial en los vectores d y S, las ecuaciones de los otros dos pasos quedan de la siguiente manera:

$$d^{i+1} = S^i - P(S^i) \quad (2.13)$$

$$S^i = S^i + U(d^{i+1}) \quad (2.14)$$

Para calcular los operadores se utilizan las siguientes relaciones [8]:

$$P_j^i = \begin{cases} p_m & \text{si } j = 2^i \cdot m \\ 0 & \text{si } j \neq 2^i \cdot m \end{cases} \quad (2.15)$$

$$U_j^i = \begin{cases} u_m & \text{si } j = 2^i \cdot m \\ 0 & \text{si } j \neq 2^i \cdot m \end{cases} \quad (2.16)$$

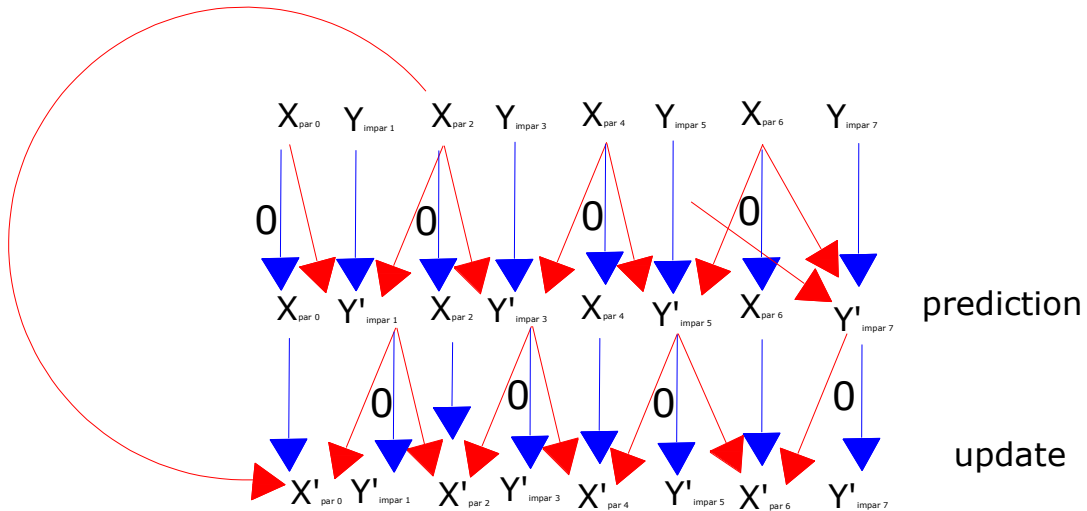


Figura 2-8 Esquema de Lifting Redundante

2.5.3. ESQUEMA DE LIFTING REDUNDANTE MEJORADO

El problema del Esquema de *Lifting* redundante es que no controla del todo bien la propagación de errores, en el artículo del que surge la idea de este proyecto [3] se introducen mejoras en el proceso.

La única modificación introducida es que se multiplican las señales de detalle por un coeficiente, dicho coeficiente se calcula a partir de la conservación de la energía total de la señal.

$$r^{i+1} = a_{i+1} \cdot d^{i+1} \quad (2.17)$$

$$a_{i+1} = \sqrt{\frac{E_s^i - E_s^{i+1}}{E_d^{i+1}}} \quad (2.18)$$

$$E_s^{i+1} = \sum_{j=1}^n (S_j^{i+1})^2 \quad (2.19)$$

$$E_c^{i+1} = \sum_{j=1}^n (C_j^{i+1})^2 \quad (2.20)$$

2.5.3. CYCLE SPINNING

Esta es otra alternativa para crear un esquema de *Lifting* con estabilidad temporal. La idea es la siguiente, se dividirá la señal y posteriormente se hace un desplazamiento, lo que implica que las muestras pares pasarán a ser impares y las impares pasarán a ser pares. Ahora aplicamos los pasos de predicción y actualización a ambas señales (antes y después del desplazamiento). Posteriormente se cogen ambas señales y se vuelven a dividir, y así continuamos calculando todas las posibles alternativas, de este modo el resultado será el mismo independientemente del desfase existente.

Puede verse en la figura 2-9 un esquema del algoritmo [5].

Puede resultar engorroso trabajar con tantas señales, por ejemplo con 4 niveles de descomposición se obtendrían 30 señales, una opción para seguir obteniendo una única señal por nivel es calcular la media entre todas las señales de cada nivel, esto seguiría manteniendo la estabilidad temporal.

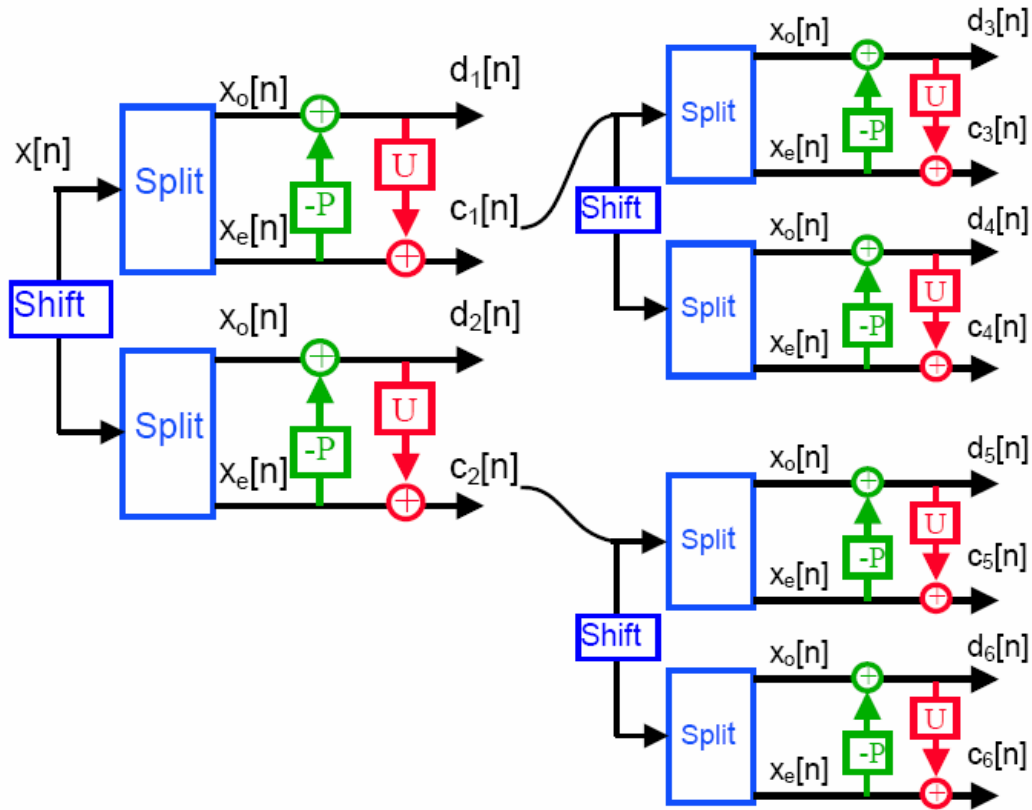


Figura 2-9 Esquema del Cycle Spinning [5]

2.6. TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG

Ya hemos visto que existen métodos para tratar conjuntos de datos no estacionarios, así mismo existen métodos desarrollados para tratar datos no lineales; pero la mayoría de las señales reales contienen datos no estacionarios y no lineales, para tratar este tipo de datos se requiere de un método adaptativo y la transformada de Hilbert-Huang cumple esta condición [6].

Un método adaptativo es aquel en el que la definición de la base es dependiente de los datos y por tanto se realiza a posteriori, esto rompe con los métodos tradicionales de análisis de señales.

En el caso de la transformada de Hilbert-Huang, el tratarse de un método adaptativo tiene un precio que es la dificultad de encontrar una base teórica firme. Se trata de un método empírico que hasta el momento ha presentado en todos los casos estudiados mejores aproximaciones que los métodos tradicionales para representaciones tiempo-frecuencia-energía.

La transformada de Hilbert-Huang puede dividirse en dos etapas: Descomposición modal empírica y Análisis espectral de Hilbert.

- DESCOMPOSICIÓN MODAL EMPÍRICA

La descomposición modal empírica se basa en la suposición de que cualquier conjunto de datos puede dividirse en un conjunto de modos de oscilación intrínsecos. Cada modo de vibración, lineal o no, representa una oscilación simple que tiene el mismo número de extremos relativos y puntos de corte con el eje OX. Además la oscilación será simétrica respecto de su media local. Es decir, en un instante de tiempo los datos tienen una gran cantidad de modos de oscilación, cuya suma es el estado de vibración total. Cada uno de los modos de vibración se llama *función modal intrínseca* (IMF) y puede definirse de la siguiente manera [6]:

- ✓ En el conjunto total de datos el número de extremos y ceros debe ser igual.
- ✓ En cualquier punto, el valor medio de la envolvente definida por los máximos relativos y la envolvente definida por los mínimos relativos es cero.

El algoritmo de la descomposición modal empírica es el siguiente:

Se identifican todos los máximos y los mínimos y se traza una spline cúbica que pase por todos los máximos y otra que pase por todos los mínimos, la media de ambas splines será m_1 .

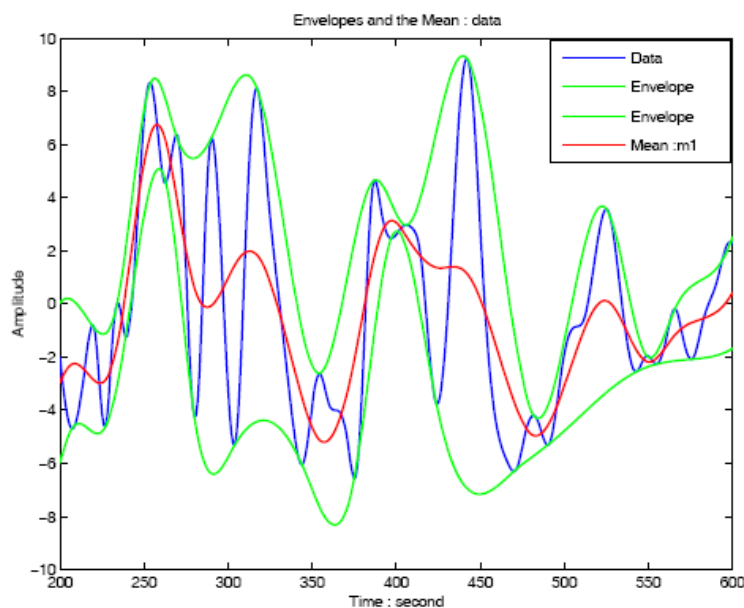


Figura 2-10: Shifting process

Se resta dicha media al conjunto total de datos obteniendo h_1 .

$$h_1 = x - m_1 \quad (2.21)$$

Volvemos a repetir este proceso con h_1 , y obtendremos la media m_2 y un nuevo subconjunto h_2 . Este proceso, denominado *shifting process* debe ser repetido tantas veces como sea necesario hasta conseguir una IMF [6].

Surge la necesidad de establecer un criterio de parada, hay dos posibilidades, la primera de ellas es que la diferencia cuadrática (ecuación 2.22) entre dos muestras consecutivas sea menor que un valor prefijado. El problema es que este criterio de parada no asegura que nuestra IMF tenga el mismo número de extremos y ceros. Huang propone un segundo método, el proceso parará cuando el número de ceros y extremos difiera en no más de 1 consecutivamente durante un número prefijado de veces. Tras algunos estudios se determinó que dicho número debe estar comprendido entre 4 y 8 veces, en este proyecto se ha decidido que el número de veces que debe repetirse consecutivamente la condición para que el proceso pare sea 6.

$$SD_k = \frac{\sum_{t=0}^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_{t=0}^T h_{k-1}(t)^2} \quad (2.22)$$

Una vez se cumple el criterio de parada separamos nuestra IMF, se la restamos a los datos iniciales obteniendo un residuo al que volveremos a aplicar el *shifting process*. Seguiremos aplicando la descomposición hasta que se cumpla uno de los dos siguientes criterios. Que el valor de los residuos sea muy pequeño o que estos sean una función sin extremos relativos de la que no se podrán extraer más IMF.

El resultado final debe ser algo parecido al ejemplo mostrado en la figura 2-11 [6].

Evidentemente la señal inicial puede recomponerse con tan sólo sumar los IMF obtenidos y los residuos finales, dichos residuos suelen despreciarse a la hora de efectuar el análisis posterior.

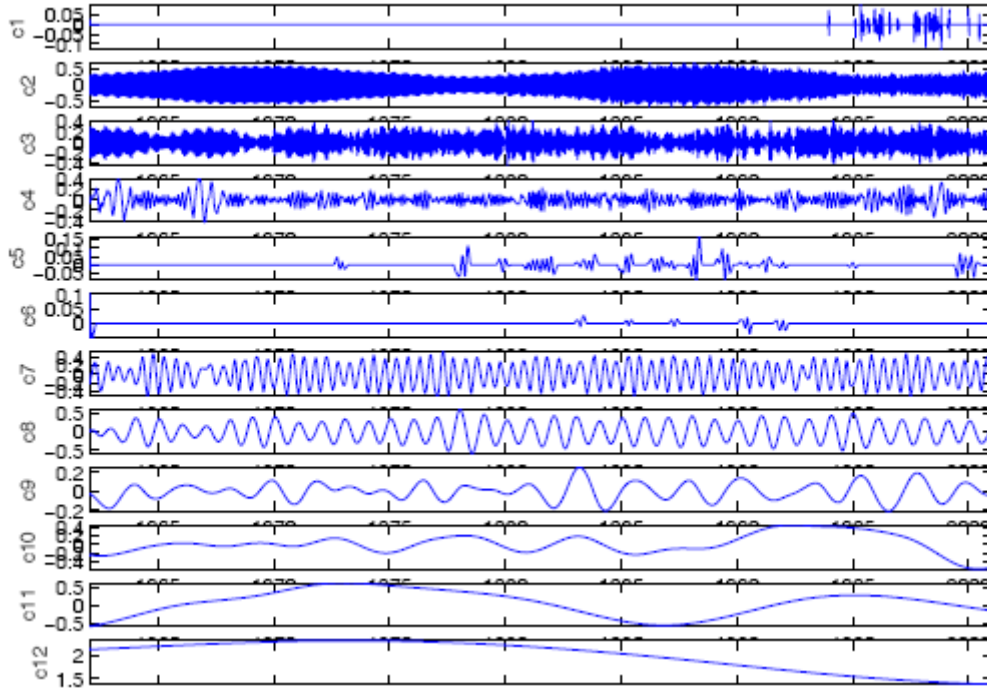


Figura 2-11: Descomposición Modal Empírica de una señal

- ANÁLISIS ESPECTRAL DE HILBERT

Una vez hecha la descomposición modal empírica puede aplicarse la transformada de Hilbert a cada uno de los IMF obtenidos. El motivo para realizar la descomposición es poder encontrar las frecuencias instantáneas de la señal, antes de que Huang introdujera la EMD la utilización de la transformada de Hilbert se limitaba a señales con el mismo número de extremos y ceros [6].

La transformada de Hilbert se define como

$$y(t) = H[x(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(u)}{t-u} du \quad (2.23)$$

La señal analítica se define como

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (2.24)$$

Donde

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (2.25)$$

$$\theta(t) = \arctg\left(\frac{y(t)}{x(t)}\right) \quad (2.26)$$



Por último podemos hallar la frecuencia instantánea por medio de la ecuación 2.27.

$$\omega(t) = \frac{d\theta}{dt} \quad (2.27)$$

Con estos datos puede realizarse una gran cantidad de análisis, todos los ensayos indican que la transformada de Hilbert-Huang es una herramienta muy potente para el análisis tiempo frecuencia de señales no lineales y no estacionarias. Está basada en una base adaptativa y la frecuencia se define a través de la transformada de Hilbert.

2.7 MÉTODO SHOCK PULSE

Para ilustrar este punto empecemos por un poquito de historia. La primera utilización de este método data de principios de los 70. Un Ingeniero de la empresa IRD estaba observando en un osciloscopio la salida de un acelerómetro colocado en un rodamiento. El Ingeniero en cuestión se dio cuenta de que había una serie de picos en la señal. Posteriores investigaciones determinaron que los picos estaban relacionados con la frecuencia de resonancia del cristal piezoeléctrico del acelerómetro. El cristal resonaba a 17 KHz y dicha frecuencia se veía excitada cuando el rodamiento no tenía una adecuada lubricación o existían pequeños defectos en éste.

IRD desarrolló un aparato de medida llamado *Spike Energy*, que simplemente tomaba la señal del acelerómetro y la convertía de mV a G utilizando la sensibilidad del piezoeléctrico. Además se aplicaba un filtro paso alto de 1000 Hz por el que pasaba la señal.

El resultado fue un aparato de medida que respondía positivamente a las necesidades de los usuarios, de hecho muchos de ellos siguen confiando en el *Spike Energy*, a pesar de que presenta los siguientes inconvenientes.

- La mayoría de los acelerómetros no tienen la misma frecuencia de resonancia ni el mismo factor de amplificación. Por lo tanto al cambiar el acelerómetro cambia el comportamiento del *Spike Energy*.
- Cuando la máquina cambia de velocidad el *Spike Energy* cambia el valor mostrado.
- El soporte del acelerómetro es magnético. El campo magnético creado tiende a atenuar el valor del *Spike Energy*.
- No se distingue entre el valor medio y valores extremos.



Posteriormente, la compañía Sueca *Shock Pulse Method* (SPM) intentó corregir estas deficiencias.

- SPM desarrolló un acelerómetro especial cuya frecuencia de resonancia se encontraría entre los 34 y 36 KHz, esto lo hacía mucho más consistente. Dicho acelerómetro sería utilizado exclusivamente para medir pulsos de choque. La empresa *Pruftechnik* desarrolló un acelerómetro parecido pero que podía medir también vibraciones.
- El método de montaje se mejoró, seguía siendo magnético pero tenía una frecuencia de resonancia de 40 KHz que impedía que atenuara la señal.
- SPM adoptó una escala dB que permitía ver con más facilidad pequeños cambios en la amplitud.
- SPM separó los valores máximos y medios en sus medidas.
- Las medidas fueron satisfactoriamente normalizadas teniendo en cuenta el diámetro y la velocidad de giro, de modo que los cambios en ésta no hicieran variar el resultado.

Por lo tanto, el *Shock pulse method* tal cual lo conocemos fue desarrollado en Suecia por SPM INSTRUMENT AB en torno a 1970, como ya se ha indicado se basa en el hecho de que cuando una bola o rodillo contacta con un área dañada se genera un impulso. El máximo valor de choque en dB (2.28) da una idea del estado del rodamiento [3].

$$dB = 20 \cdot \log \frac{2000 \cdot SV}{N \cdot D^{0.6}} \quad (2.28)$$

Donde N denota la velocidad de rotación del rodamiento, D el diámetro interno y SV el valor de choque que debe ser obtenido a partir de las señales de vibración.

Con el valor obtenido, puede estimarse el estado del rodamiento de la siguiente manera:

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq dB < 20 \quad \text{Rodamiento correcto} \\ 20 \leq dB < 35 \quad \text{Rodamiento con falta leve} \\ 35 \leq dB < 60 \quad \text{Rodamiento con falta severa} \end{array} \right\} \quad (2.29)$$

Cabe destacar que este método permite determinar con un amplio porcentaje de acierto si un rodamiento presenta algún tipo de defecto, pero en ningún caso aporta información sobre la localización del defecto. Como ya se menciona anteriormente, en este proyecto se ha intentado combinar el método *shock pulse* con técnicas de descomposición para determinar, no sólo si existe o no defecto, sino donde se encuentra éste localizado.

En la actualidad este método tiene una gran aceptación en la industria y es la herramienta más utilizada en la predicción de faltas en rodamientos, por lo tanto se considera de interés una breve explicación de cómo funcionan los equipos que utilizan dicha técnica. [9]

Una vez tomada la medida se obtienen el valor medio y el valor máximo, cada uno nos ofrece un tipo de información diferente. Un ejemplo puede verse en la figura 2-14, en la que se han resaltado en rojo los valores máximos de los pulsos de choque y cuya media puede obtenerse con facilidad.

El contacto metal-metal se produce siempre, incluso en rodamientos nuevos. Si la lubricación fuera perfecta no nos encontraríamos con ningún pulso de choque, cuando la lubricación empieza a fallar el contacto metal-metal aumenta y el valor medio comienza a aumentar. Por lo tanto un valor alto del valor medio nos indica una inadecuada lubricación.

Cuando existe un defecto en un elemento, existe un contacto metal-metal periódico, por lo tanto un defecto hará que nos encontremos con pulsos de choque periódicos cuyo valor supera la media. Esto quiere decir que valores máximos muy superiores a la media, nos indican la existencia de fallos localizados en el rodamiento.

Para medir el valor del pulso de choque, se utilizan filtros combinados con un acelerómetro diseñado especialmente para este tipo de medidas. Una vez tomada la medida, como por ejemplo la de la figura 2-12, se siguen los siguientes pasos [9]:

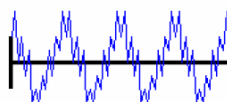


Figura 2-12 Señal no filtrada

- **Amplificación:**

Las señales obtenidas, en general, son relativamente pequeñas. Para amplificar dichas señales se utiliza un cristal piezoeléctrico que es el elemento que genera la señal en el acelerómetro, se construyen de modo que su frecuencia de excitación esté en torno a 36 KHz.

- **Filtrado:**

Se utiliza un filtro paso banda en torno a 36 KHz para diferenciar otras vibraciones de los pulsos de choque [9]. Puede observarse un ejemplo de una señal ya filtrada en la figura 2-13.

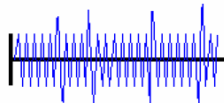


Figura 2-13 Señal filtrada y amplificada

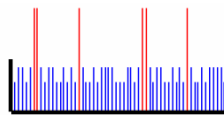


Figura 2-14 Señal analógica



3. DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 OBTENCIÓN DE DATOS

Como ya se indicó en la introducción la obtención de las señales de vibración no es una de las partes de este proyecto, las señales con las que se ha trabajado se obtuvieron en un trabajo dirigido del departamento de Ingeniería mecánica de la Universidad Carlos III de Madrid, llevado a cabo por Iván Martínez Aldana [1].

En dicho trabajo se utilizó la máquina simuladora de fallos de la figura 3-1. Como se puede ver, la máquina está compuesta por un motor eléctrico, un eje, dos rodamientos y unos discos que actúan como volante de inercia.

Se utilizó el acelerómetro de la figura 3-2 conectado a la tarjeta de adquisición de datos de la figura 3-4 por medio del amplificador de la figura 3-3, que se ocupaba de multiplicar por 10 la señal.

Se utilizaron rodamientos sin defecto, rodamientos con defecto en bola, con defecto en la pista de rodadura externa y en la pista de rodadura interna. En todos los casos la frecuencia de muestreo fue de 5000 Hz.

Se hizo girar al motor a tres velocidades diferentes 600rpm, 1200rpm y 1800rpm.

Como se muestra en la tabla 3-1, el número de muestras mínimo necesario es aquel que nos permita, al menos, registrar una vuelta completa del motor, pero en todos los casos siempre tomamos más, se tomaron 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 y 50000 muestras para cada una de las velocidades y cada uno de los rodamientos.

Evidentemente, nuestra máquina no se encuentra perfectamente aislada, pueden existir vibraciones debidas a efectos externos, o causadas por defectos en otros componentes de la máquina, este hecho se verá en el análisis de resultados.

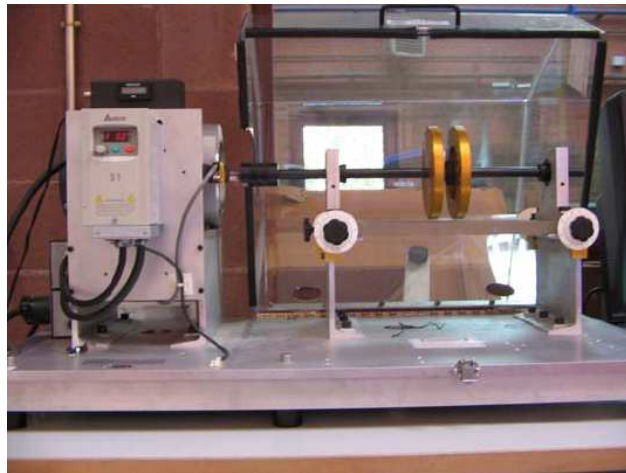


Figura 3-1 Máquina simuladora de fallos en rodamientos



Figura 3-2 Acelerómetro



Figura 3-3 Amplificador



Figura 3-4 Tarjeta de adquisición de datos

Tabla 3-1 Muestras necesarias para cada velocidad de giro

Ω (rpm)	Ω (Hz)	T (s)	MUESTRAS NECESARIAS
600	10	0.1	500
1200	20	0.05	250
1800	30	0.033	167

Los rodamientos utilizados son la serie ER10K de la marca *MB manufacturing*, las características principales de dicho rodamiento se pueden encontrar en el catálogo de dicha compañía [7], en la tabla 3-2 se indican las características necesarias para llevar a cabo este proyecto.



Figura 3-5 Rodamiento ER10K

Tabla 3-2 Características rodamiento ER10K

Diámetro interior [mm]	15.875
Diámetro exterior [mm]	46.99
Diámetro medio [mm]	33.49
Número de bolas	8
Diámetro de las bolas [mm]	7.94
Ángulo de contacto [°]	0

Con estos datos vamos a calcular todas las frecuencias de defecto para cada una de las frecuencias de giro a partir de las ecuaciones 2.1-2.4.

Tabla 3-3 Frecuencias de defecto para cada frecuencia de giro

Frecuencia de giro [Hz]	FTF [Hz]	BPFI [Hz]	BPFO [Hz]	BSF [Hz]
10	3.81	49.480597	30.519403	19.9106433
20	7.63	98.961194	61.038806	39.8212865
30	11.44	148.441791	91.558209	59.7319298

3.2 NOMENCLATURA UTILIZADA PARA LAS SEÑALES

La nomenclatura utilizada para las señales a tratar se compone de 4 símbolos identificativos X-Y-Z-T.

- X indica el tipo de defecto presente en el rodamiento, de manera que:
 - A → Rodamiento sin defecto
 - B → Rodamiento con defecto en bola
 - I → Rodamiento con defecto en la pista interna
 - O → Rodamiento con defecto en la pista externa
- Y indica la velocidad de giro del motor:
 - 10 → $f=10\text{Hz}$
 - 20 → $f=20\text{Hz}$
 - 30 → $f=30\text{Hz}$
- Z indica el número de muestras tomadas para la señal en cuestión, puede tomar los valores 5000, 10000, 15000, 20000, 25000 y 50000.
- T indica el número de la señal, ya que se tomaron 5 señales para cada caso.



De esta manera, por ejemplo la señal I-10-15000-3 sería la tercera señal tomada con 15000 muestras para el rodamiento con defecto en la pista interna girando a una frecuencia de 10 Hz.

3.3 DETECCIÓN DE DEFECTOS

En este primer apartado se va a evaluar la capacidad de cada uno de los métodos explicados en el capítulo anterior para detectar la existencia de defectos en los rodamientos, para ello se tomaron muestras de cada tipo de rodamiento y se intentó identificar la frecuencia correspondiente con el defecto presente en estos rodamientos por diferentes métodos.

En primer lugar trabajaremos con la transformada de Fourier, como ya se indicó anteriormente no se utiliza la transformada de Fourier discreta, sino la transformada rápida de Fourier que permite un ahorro computacional importante.

Posteriormente trabajaremos con la transformada de Hilbert como técnica de filtrado, con éste método pretendemos obtener resultados mucho mejores que con la transformada de Fourier.

El siguiente paso es aplicar la transformada de Hilbert-Huang, y comprobar si realmente se observan mejores resultados que con la transformada de Hilbert aplicada directamente sobre la señal.

Por último se va a probar un esquema de *Lifting* redundante (RLS) utilizando el algoritmo conocido como “*cycle spinning*” [10] conjuntamente con la transformada de Hilbert.

Todos los métodos serán programados en Matlab®, los programas y Scripts utilizados se encuentran en un cd adjunto a la memoria del proyecto, en la figura 3-6 se muestra un esquema de los programas utilizados para cada uno de los métodos, así mismo, en la sección anexos es posible encontrar una pequeña guía de utilización de dichos programas.

Matlab® es una herramienta muy utilizada en el mundo de la ingeniería, se trata de un programa con unas bibliotecas muy completas que permiten una excelente programación a alto nivel; pero la facilidad a la hora de programar tiene un coste a pagar, Matlab® está orientado a una programación matricial y no es tan rápido como otros lenguajes de programación para algoritmos con bucles que se repitan una gran cantidad de veces.

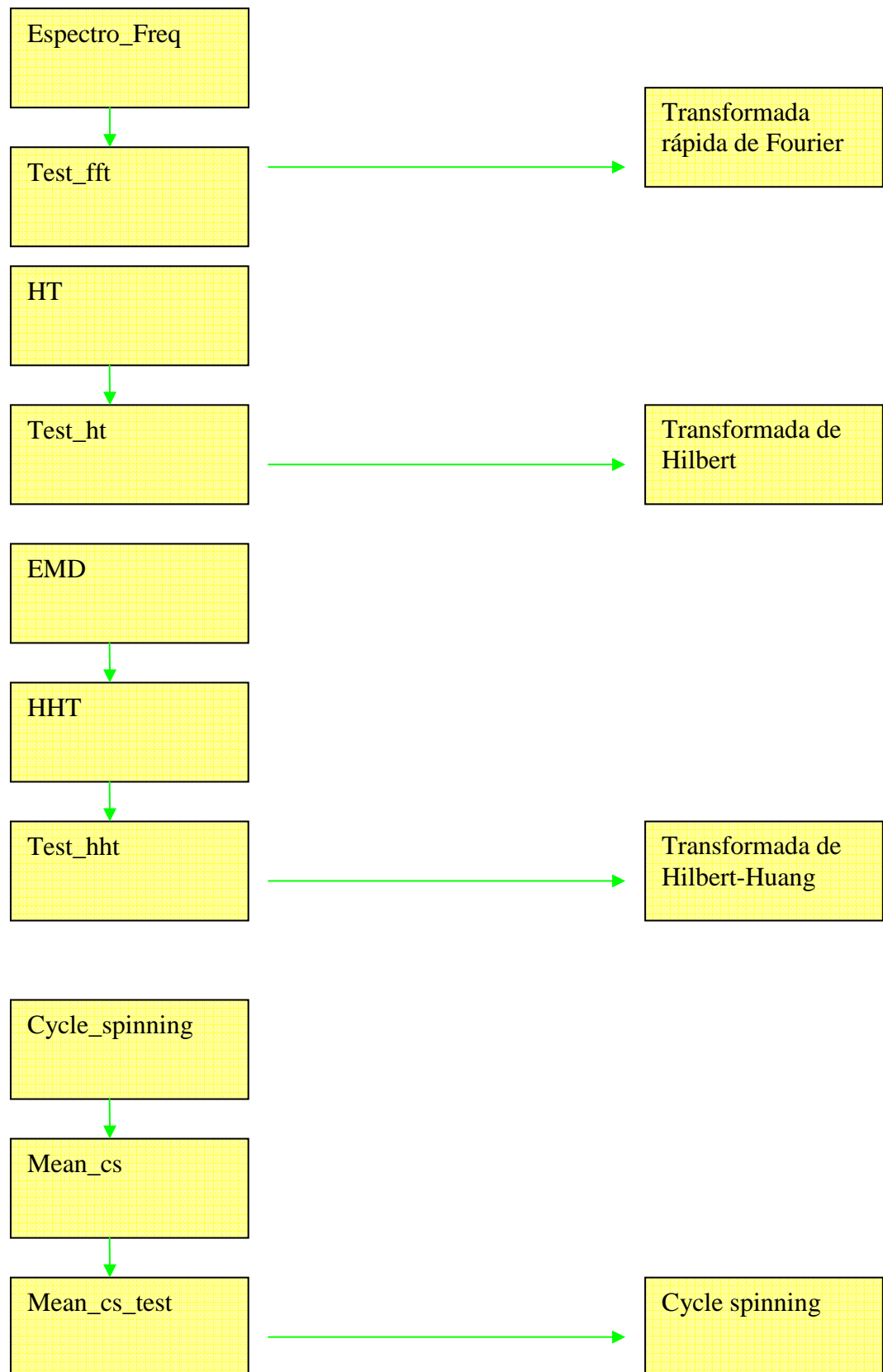


Figura 3-6 Esquema de los programas utilizados en la parte de detección de defectos



3.4 MÉTODO SHOCK PULSE

Como en el posterior análisis de resultados será posible ver, la transformada rápida de Fourier no es un buen método para nuestro análisis. Todos los demás métodos se van a combinar con el método *shock pulse* para intentar clasificar los rodamientos como defectuosos o no.

Posteriormente intentaremos identificar el tipo de defecto existente en un rodamiento al combinar el método *shock pulse* con los métodos anteriores.

Los programas y scripts utilizados se muestran en la figura 3-7.

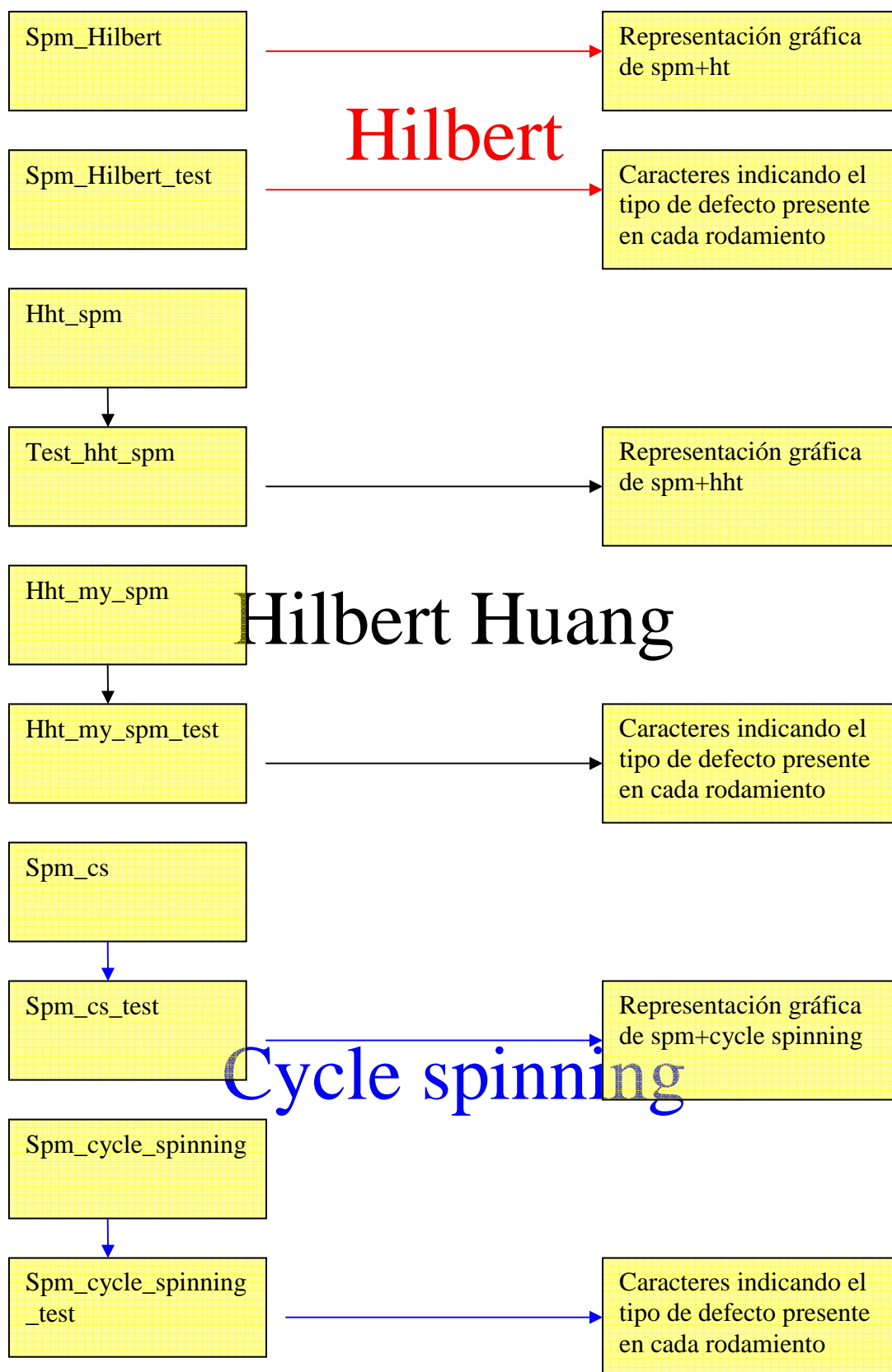


Figura 3-7 Esquema de los programas utilizados para aplicar el método shock pulse

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En esta parte se expondrán los resultados obtenidos a la hora de detectar defectos mediante los cuatro métodos propuestos: La Transformada Rápida de *Fourier*, la Transformada de *Hilbert*, la Transformada de *Hilbert-Huang* y el Esquema de *Lifting* Redundante.

4.1 TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

Se ha representado, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia, algunas de las señales con el objetivo de intentar identificar las frecuencias de defecto. Los puntos rojos se corresponden con las 5 frecuencias más amplificadas.

Las señales elegidas han sido las de 50000 puntos por disponer de una mayor cantidad de datos, pero se comprobó que los resultados eran similares independientemente del número de muestras tomadas.

Cabe decir que a priori sabemos que el resultado no será positivo, ya que la transformada de Fourier no es una herramienta suficientemente potente para tratar este tipo de señal no estacionaria.

Rodamiento no defectuoso

En la figura 4-1 se representan las señales A-10-50000-1, A-20-50000-1 y A-30-50000-1, como primer dato observamos que al aumentar la frecuencia de giro aumenta considerablemente la amplitud de las vibraciones observadas, esto nos hace pensar que nuestras señales tienen mucho ruido y que éste se incrementa al aumentar la velocidad de giro del eje. Corroboramos este hecho al ver que en el espectro en frecuencia de las señales con mayor velocidad de giro aparecen picos de vibración en frecuencias medias y altas, este hecho imposibilita el análisis mediante este método pero surge la duda de si para frecuencias de giro muy bajas sería válido.

En la figura 4-2 se representa en detalle el espectro en frecuencia de la señal A-10-50000-1, correspondiente a un rodamiento sin defecto girando a 10Hz. Se puede observar que incluso para esta frecuencia de giro es imposible detectar los picos de frecuencia que esperábamos.

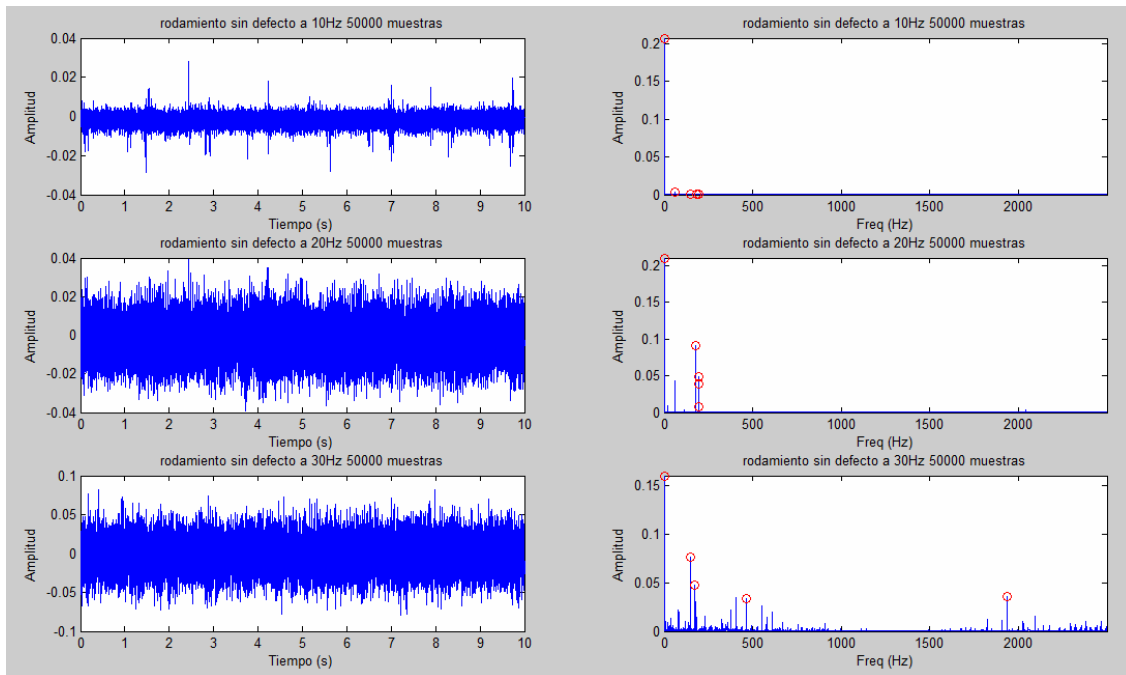


Figura 4-1 FFT Rodamiento sin defecto girando a 10, 20 y 30 Hz

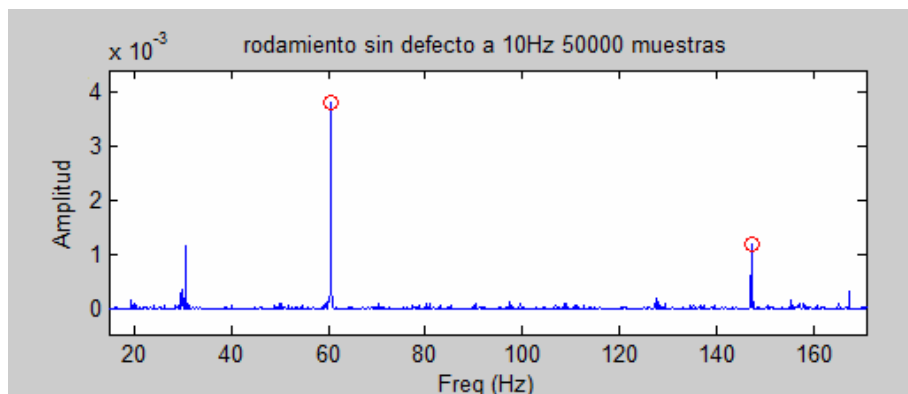


Figura 4-2 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento sin defecto girando a 10 Hz

Rodamiento con defecto en bola

En la figura 4-3 se ha representado las señales correspondientes al rodamiento con defecto en bola, volvemos a observar que al aumentar la frecuencia aumenta la amplitud de las vibraciones observadas y que en el espectro en frecuencia de las señales con mayor velocidad de giro aparecen picos de vibración en frecuencias medias y altas, es decir, la señal vuelve a tener demasiado ruido a alta frecuencia. La figura 4-4 es el detalle del espectro en frecuencia de la señal del rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz, una vez más no se puede identificar la frecuencia de defecto para este rodamiento aún a velocidades de tan sólo 600 rpm.

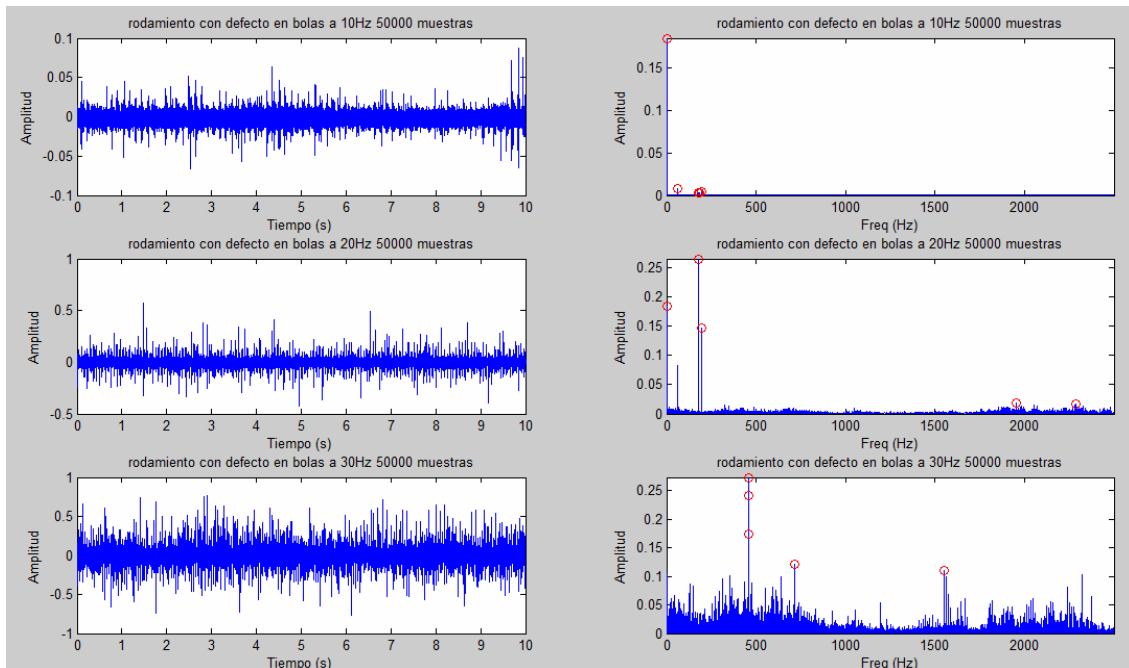


Figura 4-3 FFT Rodamiento con defecto en bola girando a 10, 20 y 30 Hz

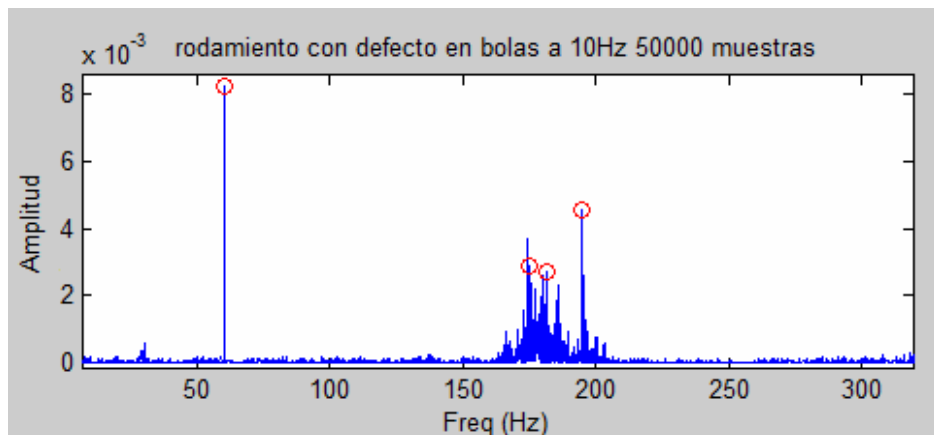


Figura 4-4 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

Rodamiento con defecto en la pista interna

En la figura 4-5 se han representado las señales I-10-50000-1, I-20-50000-1 e I-30-50000-1, se repite el comportamiento de las señales anteriores. La figura 4-6 es el detalle del espectro en frecuencia de la señal I-10-50000-1, llama la atención que en todos los casos nos encontremos con un pico en torno a 60Hz, que podría atribuirse a la frecuencia de la red eléctrica.

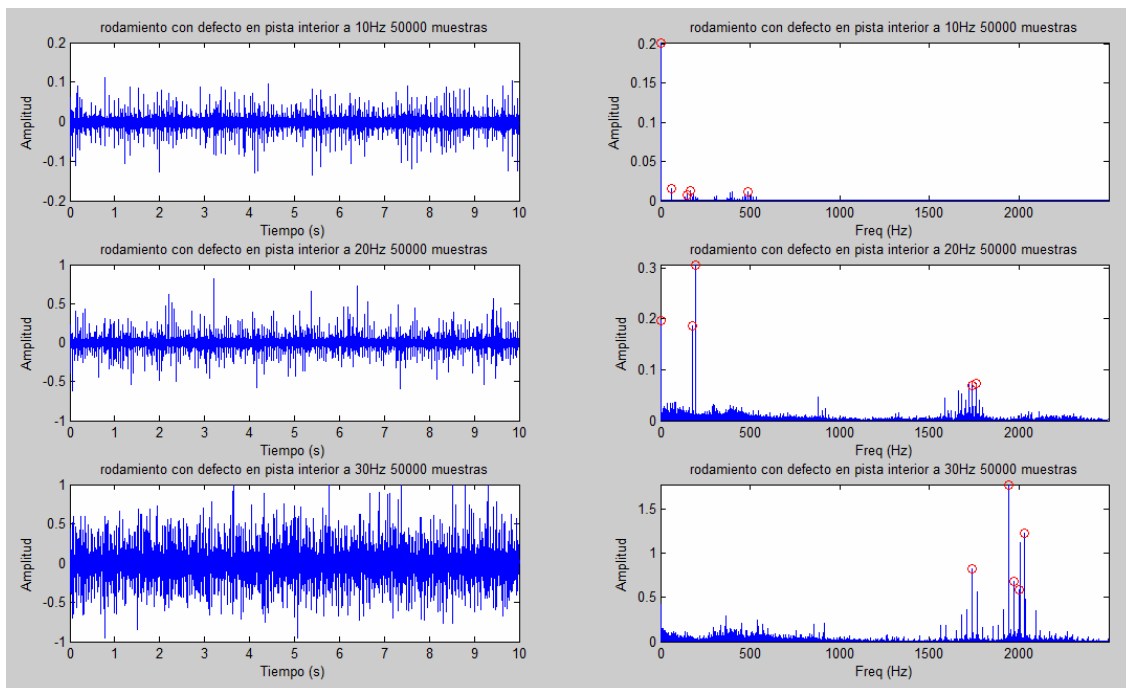


Figura 4-5 FFT Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10, 20 y 30 Hz

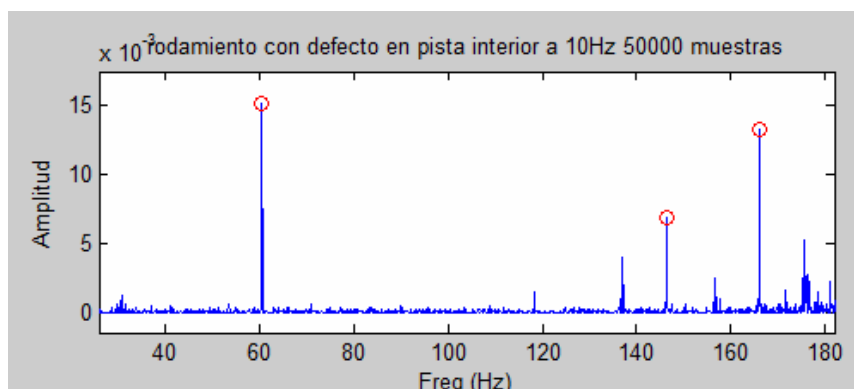


Figura 4-6 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en la pista interna a 10 Hz

Rodamiento con defecto en la pista externa

En la figura 4-5 se ha representado las señales correspondientes al rodamiento con defecto en la pista externa, mientras que la figura 4-6 se trata del detalle del espectro en frecuencia de la señal O-10-50000-1, que se corresponde con el rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz. Como era de esperar, esta señal tampoco puede ser analizada por este método a causa del ruido.

Cabe resaltar el hecho de que con sólo observar la representación en el dominio del tiempo de las señales puede intuirse qué rodamientos presentan algún tipo de defecto, ya que la amplitud de las vibraciones es, en todos los casos, mucho mayor en los rodamientos defectuosos que en el rodamiento sin fallo.

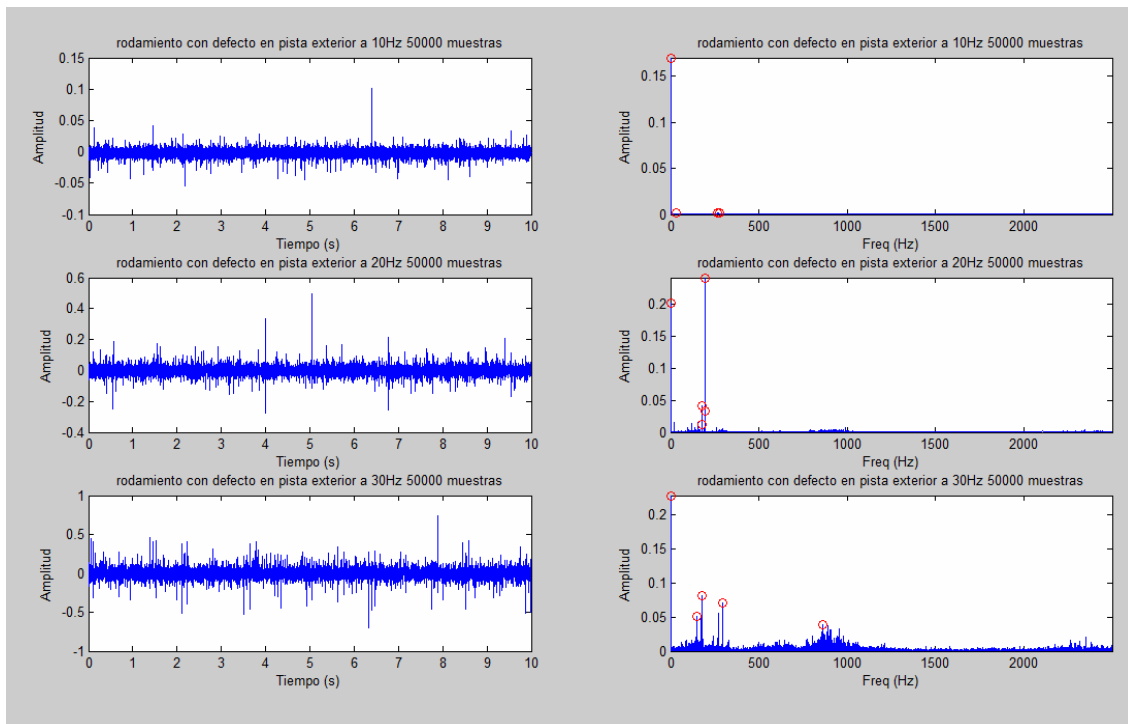


Figura 4-7 FFT Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10, 20 y 30 Hz

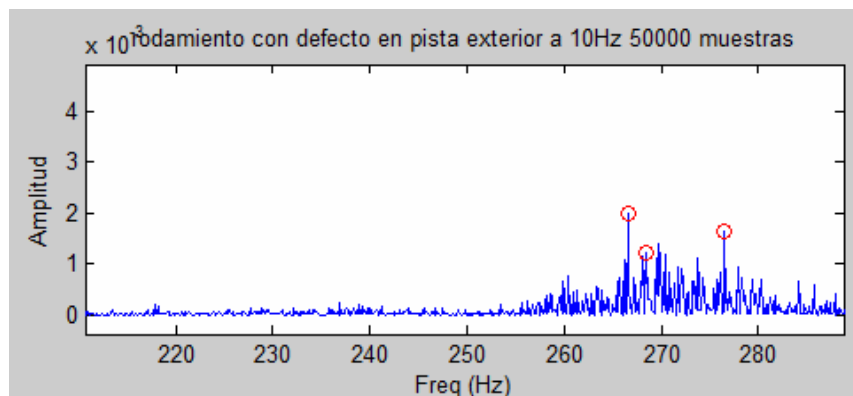


Figura 4-8 Detalle del espectro en frecuencia del rodamiento con defecto en la pista externa a 10 Hz

4.2 TRANSFORMADA DE HILBERT

Se ha representado las señales del apartado anterior en el dominio del tiempo, posteriormente se les aplica la transformada de Hilbert como método de filtrado y se aplica la transformada rápida de Fourier sobre la envolvente para obtener el espectro de frecuencias de ésta.

Rodamiento no defectuoso

En la figura 4-9 se ha representado las señales obtenidas a partir del rodamiento sin defecto girando a 10, 20 y 30 Hz. Ya habíamos comentado que al aumentar la frecuencia de giro aumentaba el ruido presente en la señal, pero en este caso vemos que cuando aumentamos la frecuencia de giro las componentes espectrales de baja frecuencia tienen una amplitud mucho mayor por lo que a primera vista la señal de 30Hz da la impresión de estar mejor filtrada que las de 10 y 20 Hz. En un análisis más detallado del espectro de frecuencias de la señal A-30-50000-1 se distingue con claridad un pico para la frecuencia de giro del motor (30Hz) y varios picos más pequeños para los múltiplos de esta frecuencia (60, 90...etc.). En el de la señal A-20-50000-1 podemos distinguir los picos para los múltiplos de la frecuencia de giro del motor, que en este caso es 20Hz; pero no se trata de un único valor sino de varios picos en torno a la correspondiente frecuencia. Para la señal A-10-50000-1 el resultado es mucho peor, observándose no sólo dichas frecuencias, sino también muchos otros picos de frecuencia no esperados. Como primera conclusión podemos decir que este método va a ser más fiable cuanto mayor sea la frecuencia de giro del motor.

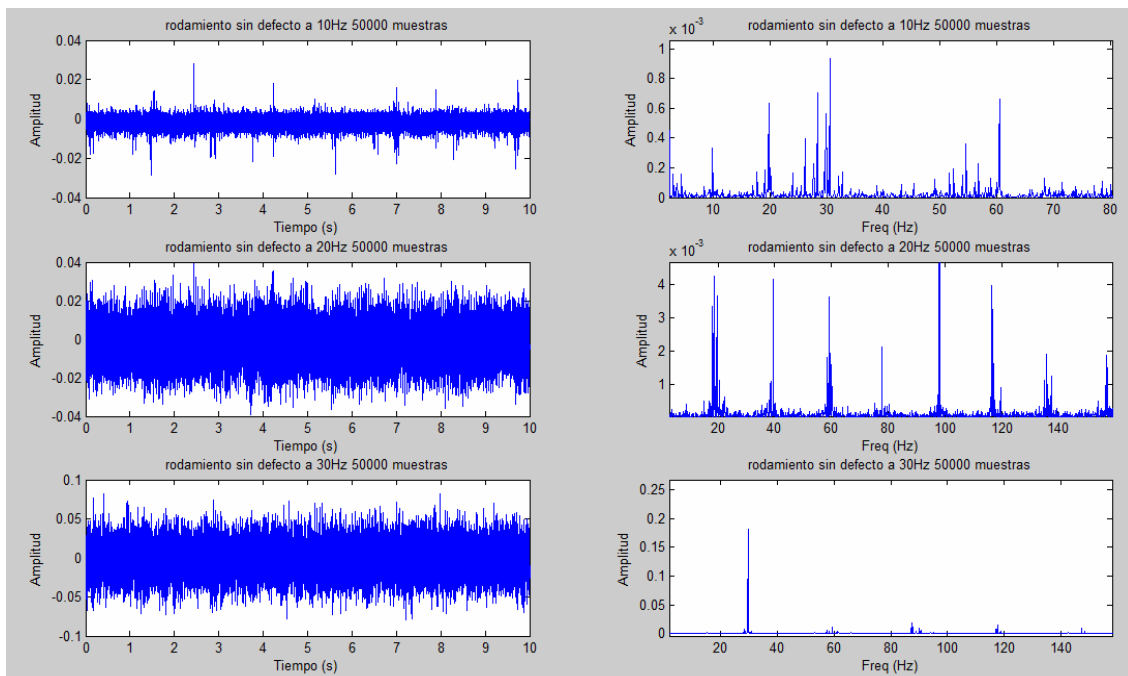


Figura 4-9 Hilbert Rodamiento sin defecto girando a 10, 20 y 30 Hz

Rodamiento con defecto en bola

Corroboramos la conclusión anterior con el análisis de la figura 4-10. Al aumentar la frecuencia de giro la amplitud del armónico principal se amplifica, por lo tanto observamos que en el espectro de la señal obtenida a partir del rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz, hay una frecuencia muy amplificada a 7.5Hz, y aún se distinguen las frecuencias de vibración del motor a 10Hz, 20Hz...etc. Para dicho rodamiento girando a 20 y 30 Hz la frecuencia más amplificada se encuentra a 15 y 22.5Hz respectivamente, dicha frecuencia está tan amplificada que impide por completo distinguir cualquier otro pico de frecuencia. En resumen, ha quedado demostrado que con este método para frecuencias de giro muy bajas el ruido puede aún jugar un papel importante, pero al aumentar la frecuencia de giro del motor distinguiremos sin ningún problema la frecuencia de defecto.

Evidentemente las frecuencias encontradas no son las de defecto, ya que se trata de frecuencias inferiores que la frecuencia de giro del motor. Si tratamos de buscar alguna explicación a dichas frecuencias podemos decir como primera hipótesis que se trata del segundo múltiplo de la velocidad de giro de la jaula, por lo tanto podría tratarse de algún tipo de defecto en la jaula. De la figura 4-11 a la 4-13 se ha pretendido representar con más detalle el espectro de frecuencias de otras tres señales para después intentar explicar cada una de las frecuencias que se observan.

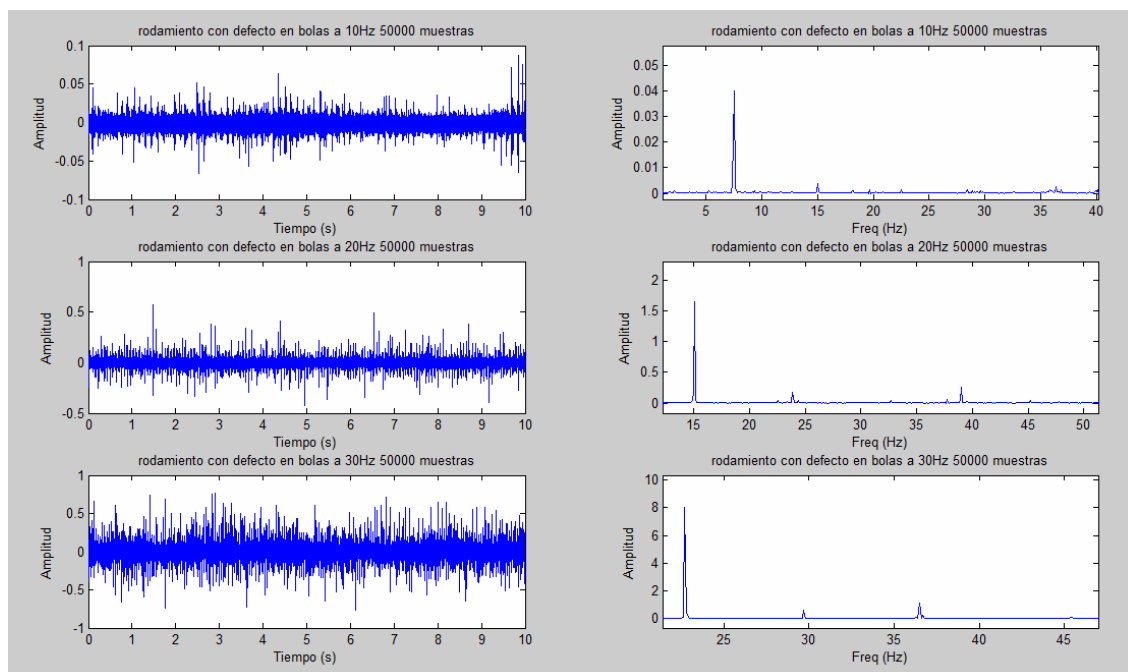


Figura 4-10 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 10, 20 y 30 Hz

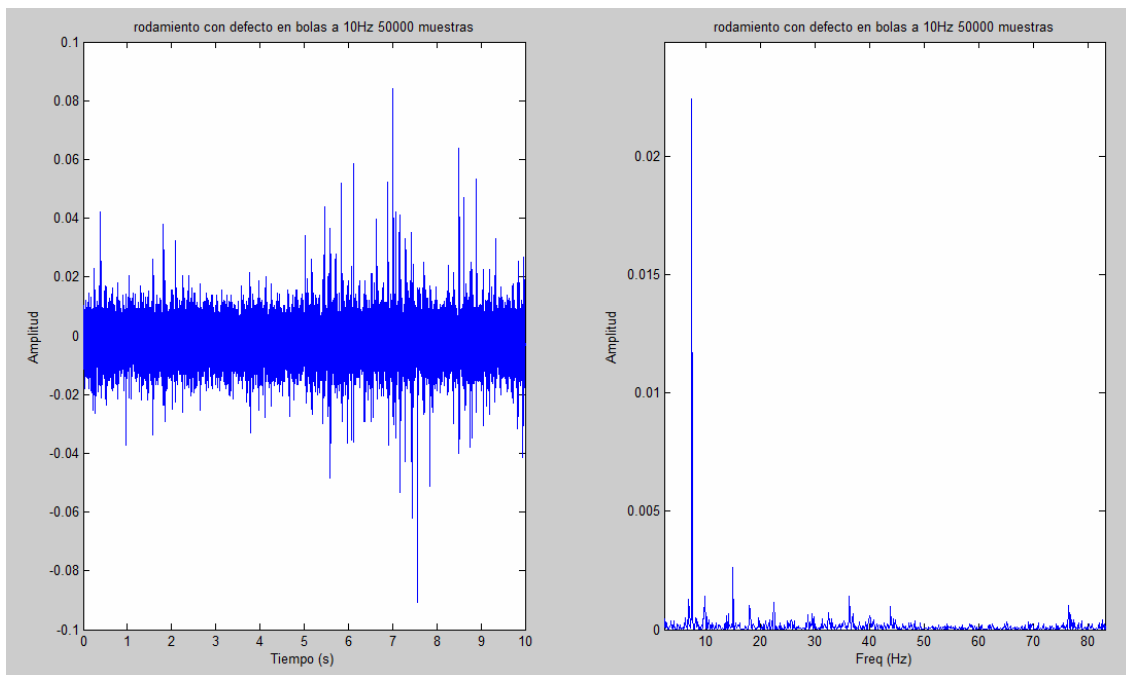


Figura 4-11 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

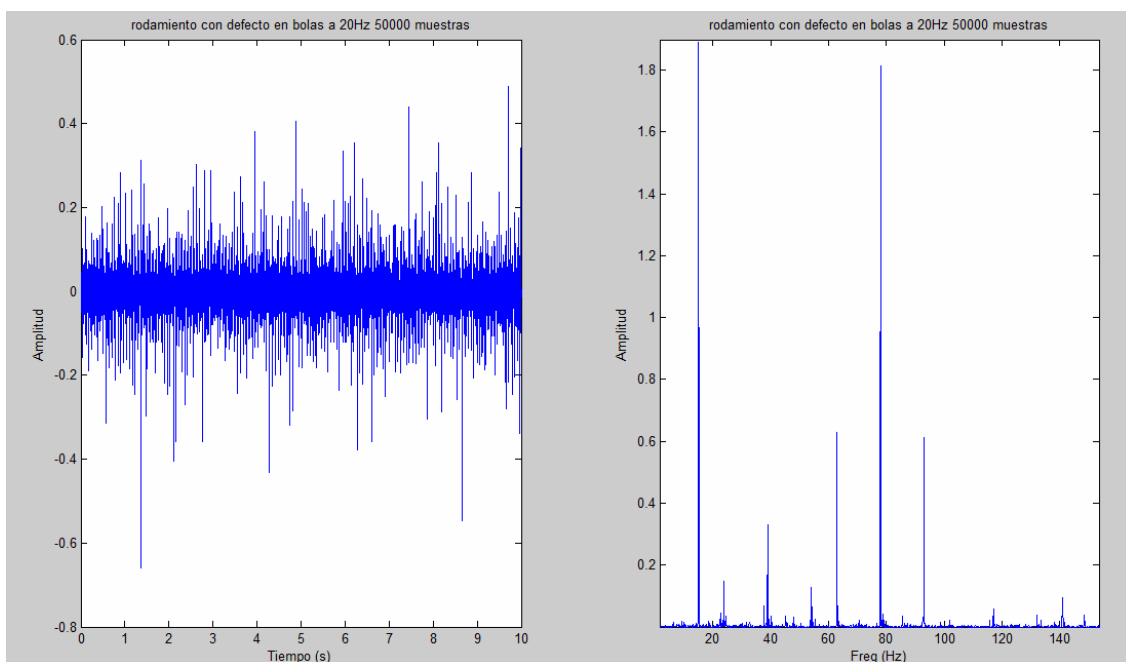


Figura 4-12 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

Como ya dijimos los espectros de frecuencias parecen ser más limpios al aumentar la velocidad de giro, es por esto por lo que elegimos la señal B-30-50000-3 para nuestro análisis. Es posible ver zooms de dicha señal en las figuras 4-14 a 4-16.

Tras identificar los picos de frecuencia más importantes se procede a su estudio en la tabla 4-1. Se ha resaltado en negrita los picos más significativos, y como puede observarse en la tabla todos los picos pueden ponerse en función de la frecuencia de giro y dos frecuencias cuyo origen se explica a continuación.

Una de las frecuencias ya se mencionó con anterioridad y se encuentra en torno a 22.7Hz, se trata de una frecuencia inferior a la frecuencia de giro del motor por lo que descartamos que se trate de una frecuencia de defecto en la pista interior o en bola. Es fácil darse cuenta de que dicha frecuencia es el segundo múltiplo de la *frecuencia de giro de la jaula*, por lo tanto podemos decir que cada media vuelta de la jaula hay un pulso de choque y probablemente este hecho se deba a algún tipo de defecto en la jaula.

La otra frecuencia se encuentra en 118.5 Hz, la frecuencia de defecto en bola es 59.73 que es aproximadamente la mitad de esta frecuencia, por lo que podría darse el caso de que se tratara de un defecto en bola cuyo segundo múltiplo está considerablemente amplificado con relación al primero.

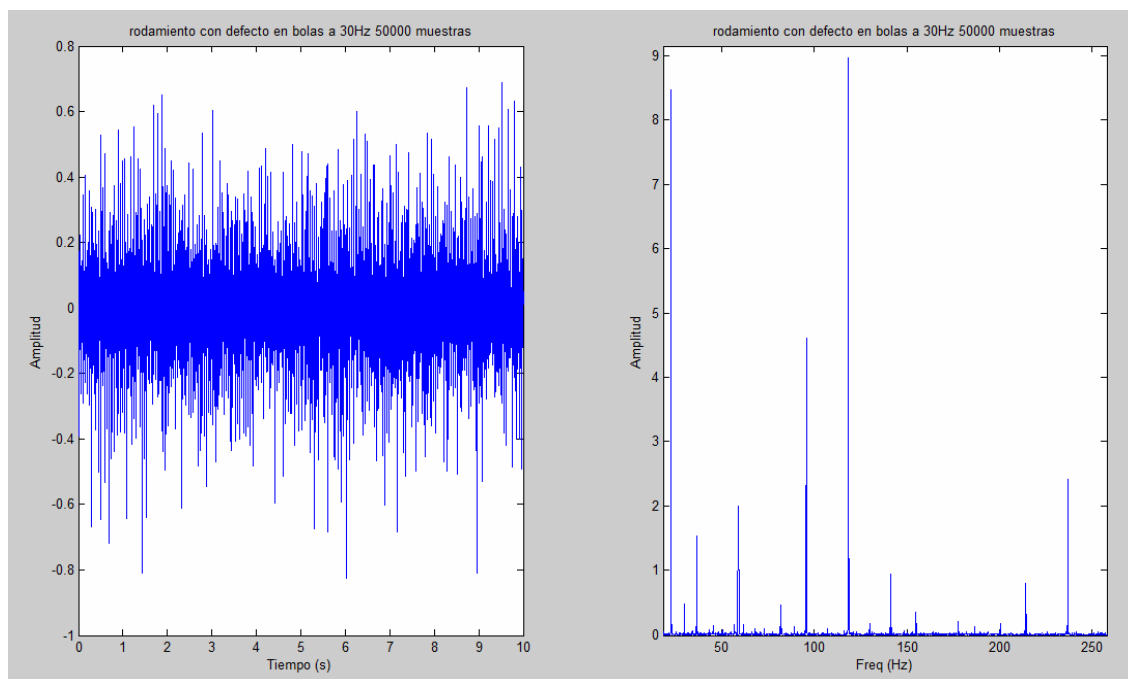


Figura 4-13 Hilbert Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

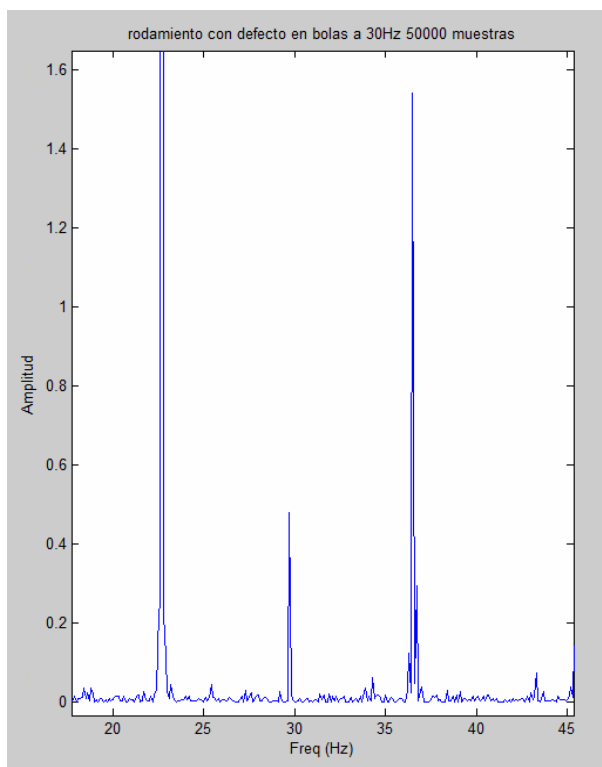


Figura 4-14 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

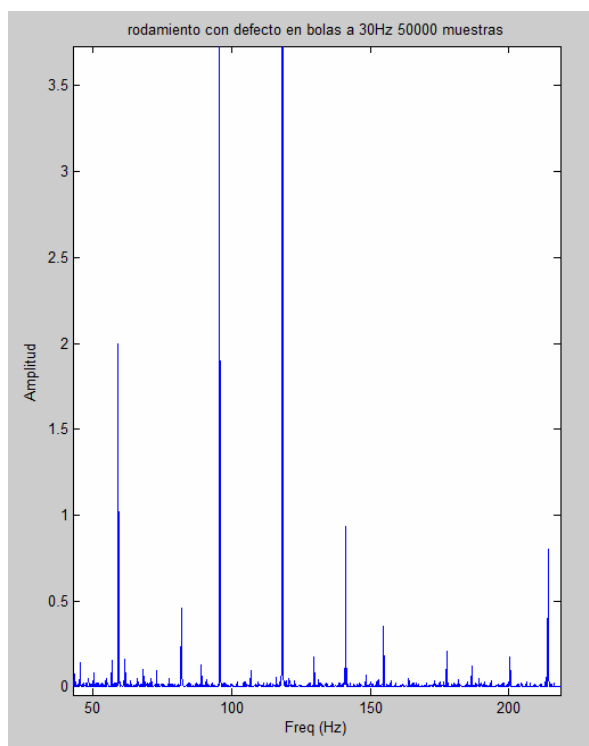


Figura 4-15 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

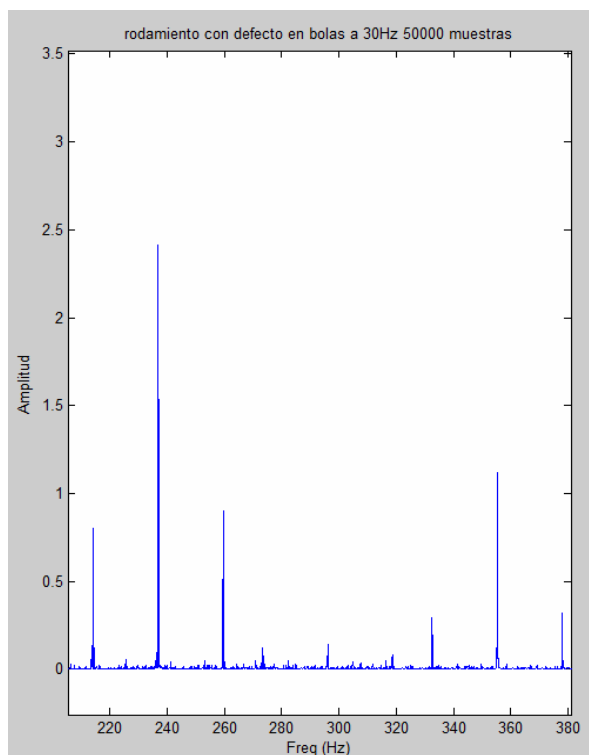


Figura 4-16 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Tabla 4-1 Análisis de frecuencias B-30-50000-3

Frecuencia [Hz]	Causa
22.7	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
29.7	Frecuencia de giro (n)
36.5	$f2-f1$
45.4	$2f1$
50.3	Frecuencia de la red (e)
59	$2n$
59.2	Frecuencia de defecto en bola (f2)
81.9	$f2+f1$
89.1	$3n$ ó $4f1$
95.7	$2f2-f1$
118.2	$4n$
118.5	$2f2$
141.2	$2f2+f1$
154.9	$3f2-f1$
177.6	$3f2$
200.4	$3f2+f1$
214.1	$4f2-f1$
236.9	$4f2$
259.6	$4f2+f1$
332.6	$6f2-f1$
355.3	$6f2$
378	$6f2+f1$

Rodamiento con defecto en la pista interna

En la figura 4-17 se distinguen muy bien las frecuencias de vibración del eje, pero en todos los casos las frecuencias de defecto deben ser menores y no se presentan claramente. Sin un análisis más profundo este hecho puede llevar a pensar que el método presenta inconvenientes para rodamientos con un defecto en la pista interior, o que estos rodamientos no tienen ningún tipo de defecto.

De las figuras 4-18 y 4-19 se extrae un análisis más detallado del que se desprenden algunas conclusiones interesantes que se presentan en la tabla 4-3.

En principio se podría hacer una interpretación parecida a la del apartado anterior, es decir, pensar que el pico en 60 Hz se trata del segundo armónico de la frecuencia de giro, pero si observamos el detalle de la figura 4-20 podemos ver que en todos los múltiplos de 3 hay varios picos, esto cobra bastante lógica si contemplamos la posibilidad de que tengamos la frecuencia de giro del motor (30 Hz), una frecuencia de defecto en bola (59.73 Hz) y la frecuencia de defecto en la pista interior (148.44 Hz). Al tratarse prácticamente de 3 múltiplos de 30, todas las combinaciones lineales entre estas tres frecuencias tomarán un valor cercano a algún múltiplo de 30 y es así como explicamos los resultados obtenidos.

Asumiendo como válido este argumento los resultados quedan como se muestra en la tabla 4-2.

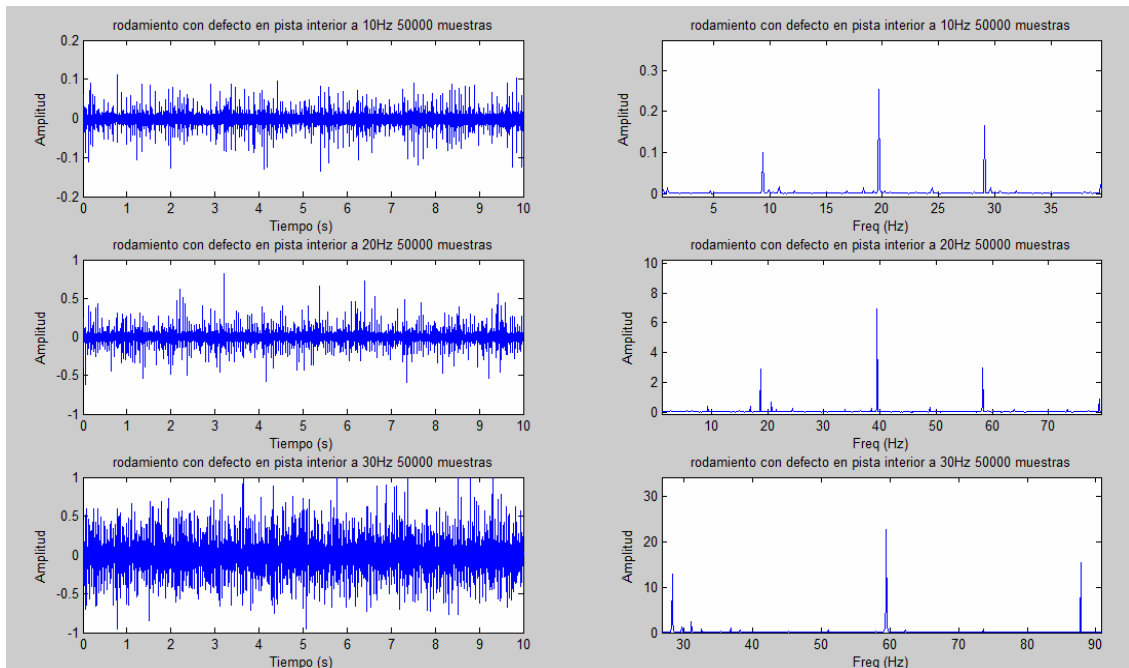


Figura 4-17 Hilbert Rodamiento con defecto en pista interna girando a 10, 20 y 30 Hz

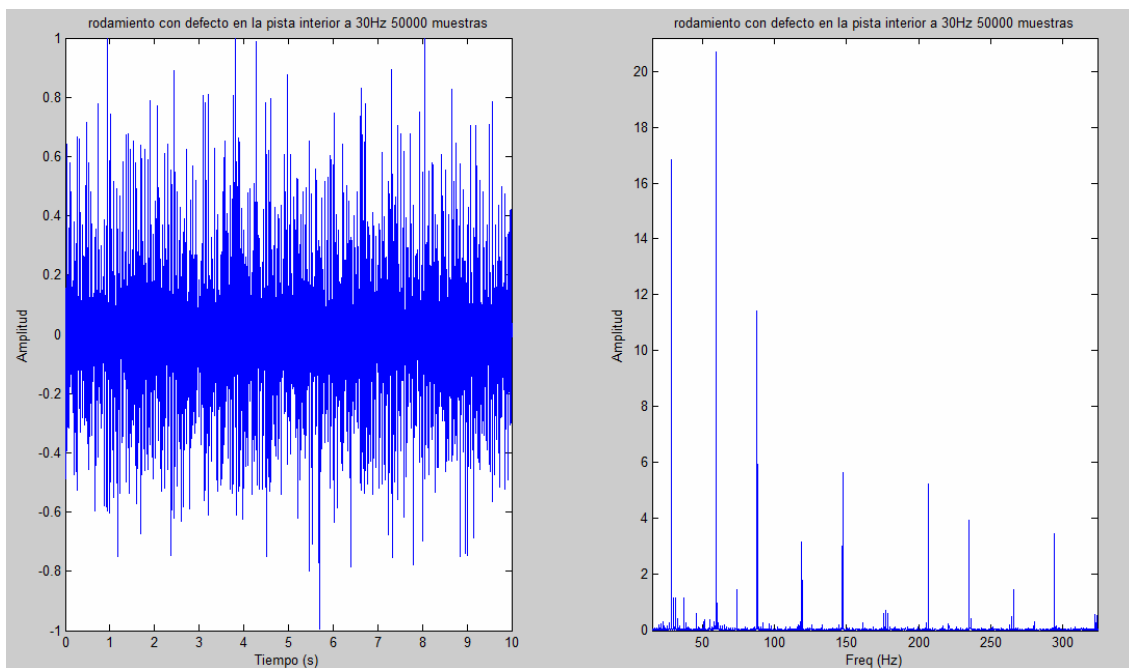


Figura 4-18 Hilbert Señal I-30-50000-4

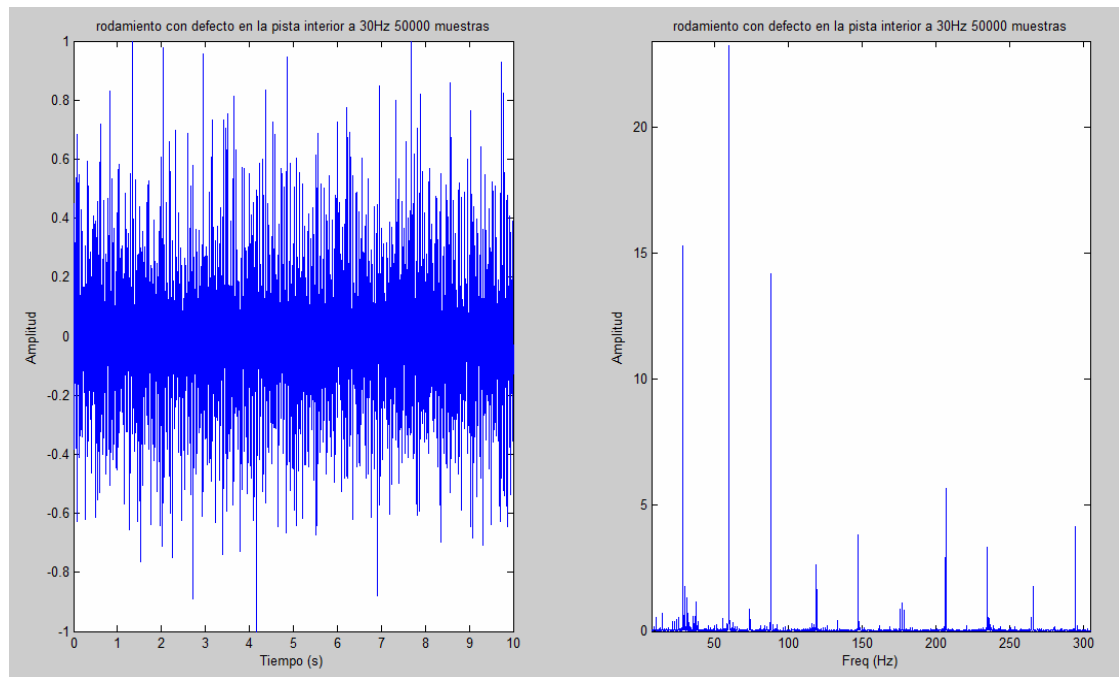


Figura 4-19 Hilbert Señal I-30-50000-5

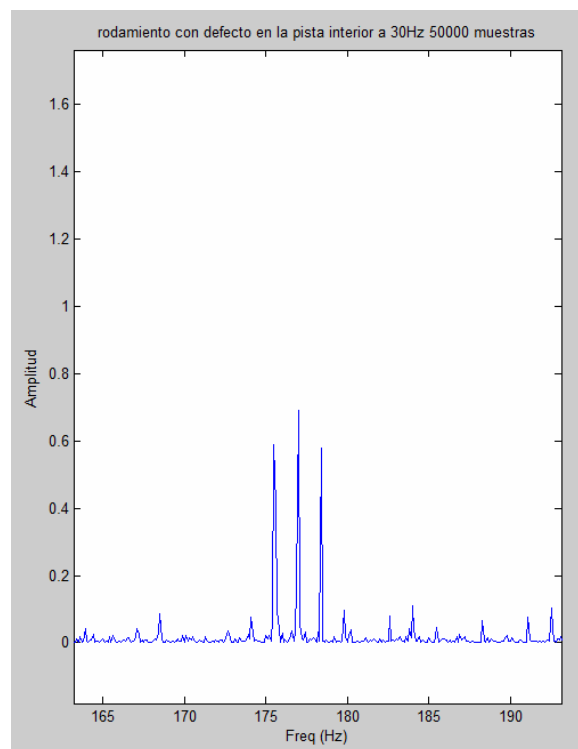


Figura 4-20 Detalle Hilbert I-30-50000-5



Tabla 4-2 Análisis de frecuencias I-30-50000-5

Frecuencia [Hz]	Causa
28.3	Frecuencia de giro (n)
29.7	0.5f₁
31.2	f ₁ -n
55.2	2n
59.5	Frecuencia de defecto en bola (f₁)
73.6	0.5f ₂
87.8	f₁+n
118.9	2f ₁
147.2	Frecuencia de defecto en la pista interna (f₂)
175.6	f ₂ +n
177	f ₂ +0.5f ₁
178.4	3f ₁
206.7	f₂+f₁
235	2f ₂ -f ₁
266.2	2f ₂ -n
294.5	2f ₂
322.8	2f ₂ +n
354	2f ₂ +f ₁
382.3	2f ₂ +f ₁ +n

Rodamiento con defecto en la pista externa

A primera vista podemos distinguir frecuencias de defecto de 60 y 90Hz para las señales correspondientes a las frecuencias de giro de 20 y 30 Hz respectivamente, que se muestran en la figura 4-21, este resultado es exactamente el esperado. En el caso de la señal O-10-50000-1, en la que la frecuencia de giro del eje es 10 Hz, esperamos un pico de frecuencia en 30Hz pero éste no se distingue a simple vista, una vez más queda demostrado que el método es más fiable cuanto mayor sea la velocidad de giro del rodamiento.

En las figuras 4-22, 4-23 y 4-24 se muestra un detalle del espectro de frecuencias de la señal O-10-50000-1, resulta fácil advertir la existencia de la frecuencia de defecto pese a que el primer múltiplo de la frecuencia de giro del motor tenga una amplitud mucho mayor. En la tabla 4-3 se resumen los resultados para dicho rodamiento.

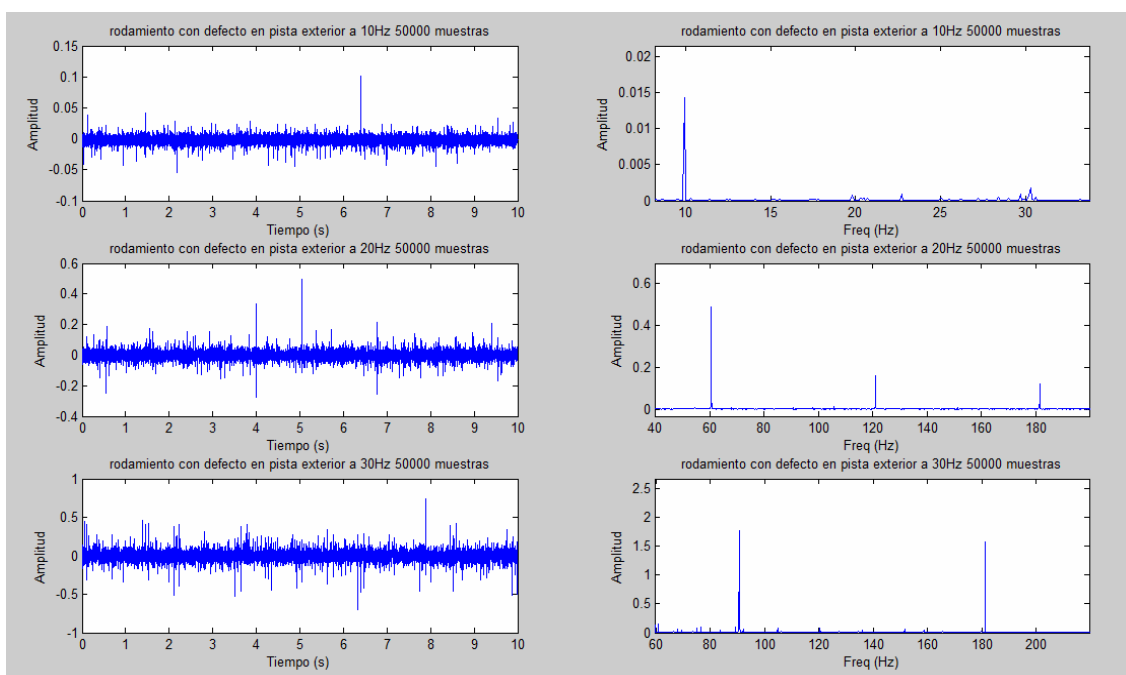


Figura 4-21 Hilbert Rodamiento con defecto en pista externa girando a 10, 20 y 30 Hz

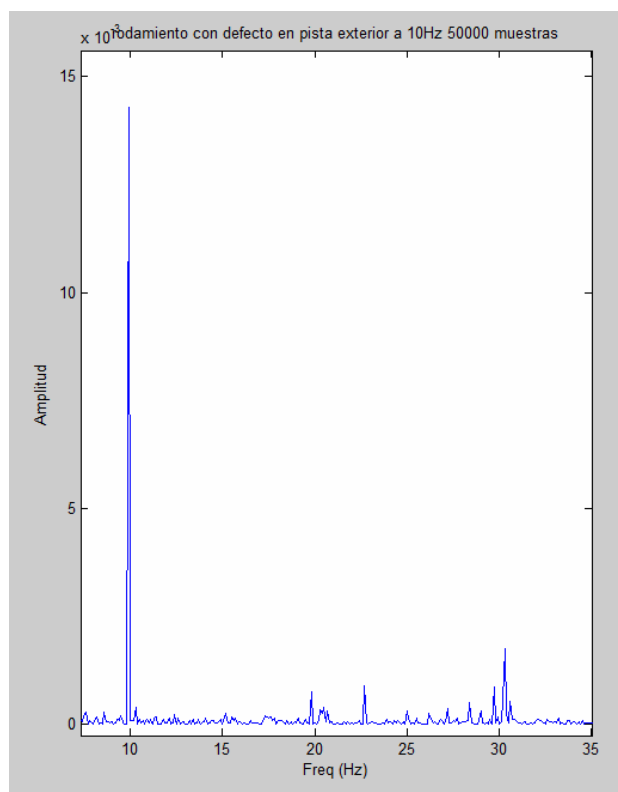


Figura 4-22 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz

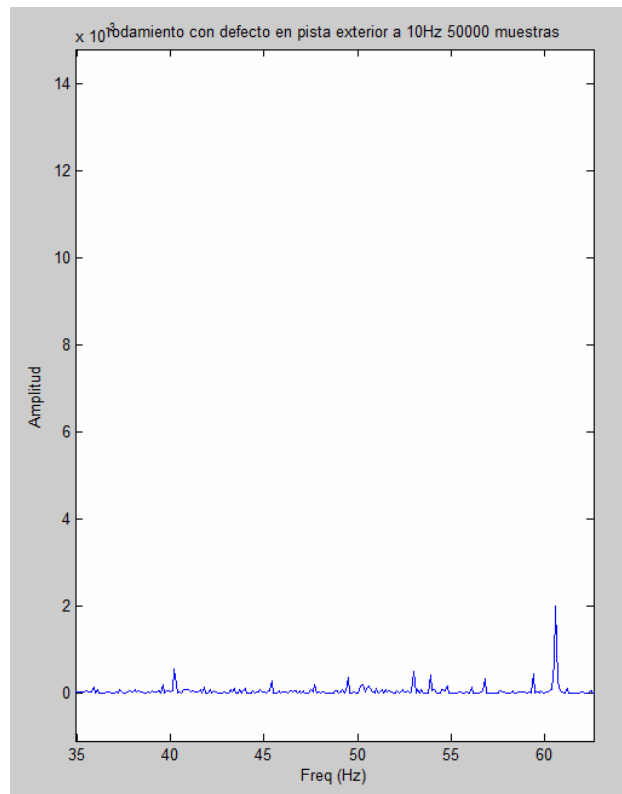


Figura 4-23 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz

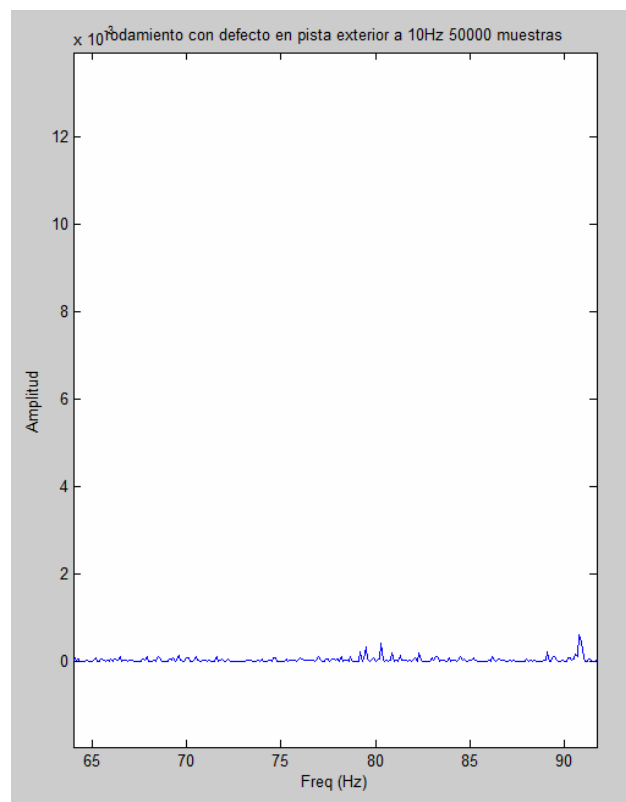


Figura 4-24 Hilbert Detalle del rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz

Tabla 4-3 Análisis de frecuencias O-10-50000-1

Frecuencia [Hz]	Causa
9.9	Frecuencia de giro (n)
19.8	2n
20.5	f1-n
29.7	3n
30.3	Frecuencia de fallo en la pista exterior (f1)
39.6	4n
40.2	f1+n
49.6	5n
59.5	6n
60.5	2f1
79.5	8n
90.9	3f1
121.2	4f1
151.4	5f1

De este modo los resultados aplicando la transformada de Hilbert son los de la tabla 4-4, se ha calculado el error cometido al estimar la frecuencia de defecto, la amplitud del pico a dicha frecuencia y la amplitud máxima, que no serán iguales porque en el rodamiento con defecto en bola aparece más amplificado el defecto en la jaula y en el rodamiento con defecto en la pista interna hay un defecto en bola que también aparece más amplificado.

Tabla 4-4 Frecuencias encontradas mediante transformada de Hilbert

Defecto	Frecuencia de giro	Frecuencia de defecto encontrada	Error	Amplitud	Amplitud máxima
BOLAS	10	19.7	1.069%	$1.3 \cdot 10^{-3}$	0.04
	20	39	2.106%	0.26	1.65
	30	59.2	0.899%	2.10	10.05
PISTA INTERNA	10	48.8	1.395%	0.09	0.165
	20	97.8	1.187%	1.41	6.95
	30	147.2	0.844%	5.66	22.79
PISTA EXTERNA	10	30.3	0.724%	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$
	20	60.5	0.891%	0.49	0.49
	30	90.7	0.946%	1.78	1.78

4.3 TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG

Rodamiento no defectuoso

En la figura 4-26 se muestran todas las *funciones modales intrínsecas* IMF obtenidas tras la *descomposición modal empírica* EMD para la señal extraída de un rodamiento sin defecto girando a 10 Hz, así como el espectro de frecuencias obtenido tras aplicarles la transformada de Hilbert. En principio se quería elegir señales con 5000 muestras para reducir la complejidad de cálculo pero, como posteriormente se demostrará, al aumentar el número de muestras se obtienen mejores resultados, y el algoritmo converge lo suficientemente rápido como para que no suponga un problema su aplicación a señales con un mayor número de muestras. Volvemos a encontrarnos con un valor extremo para frecuencias cercanas a 0 para todos los espectros de frecuencias (ver figura 4-26). En la figura 4-25 se muestra el detalle de los espectros de frecuencias de la primera IMF despreciando dicho valor se puede ver que no hay ninguna frecuencia de defecto, el pico más destacado es la frecuencia de giro del motor (10 Hz) así como sus múltiplos. Se ha elegido la primera IMF porque es la única que aporta información útil.

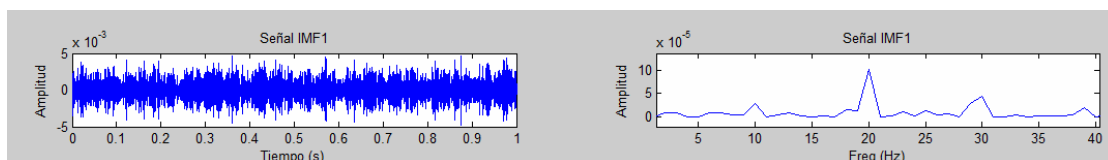


Figura 4-25 Detalle de la primera IMF para un rodamiento sin defecto girando a 10 Hz

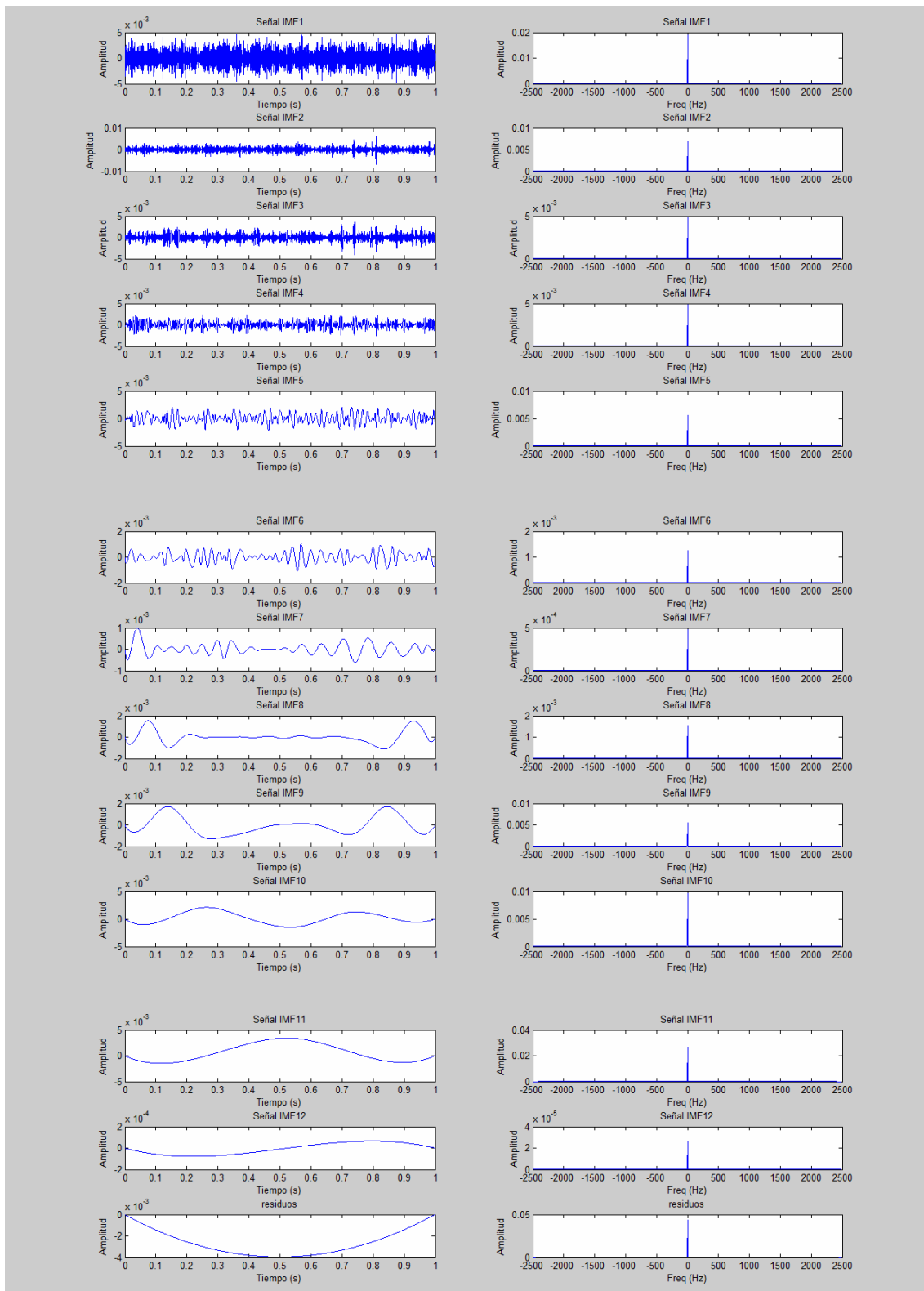


Figura 4-26 Transformada de Hilbert-Huang de las IMF de un rodamiento a 10 Hz

De ahora en adelante se representarán sólo las primeras IMF y se despreciará el valor máximo cerca del 0. En la figura 4-27 se puede ver la señal A-30-5000-1, en la que el eje gira a 30 Hz. Una vez más se distingue con claridad la frecuencia de giro del motor (30 Hz) y sus primeros múltiplos. Ahora surge la pregunta. ¿Qué resultado obtendríamos con un mayor número de muestras?

En la figura 4-28 se muestra el detalle de la señal A-30-50000-1, que en lugar de 5000 muestras dispone de 50000; como se puede ver los resultados son mucho más claros que en la figura 4-27, esto quiere decir que obtendremos mejores resultados tomando señales de mayor número de muestras, por lo tanto se hará así en lo que sigue.

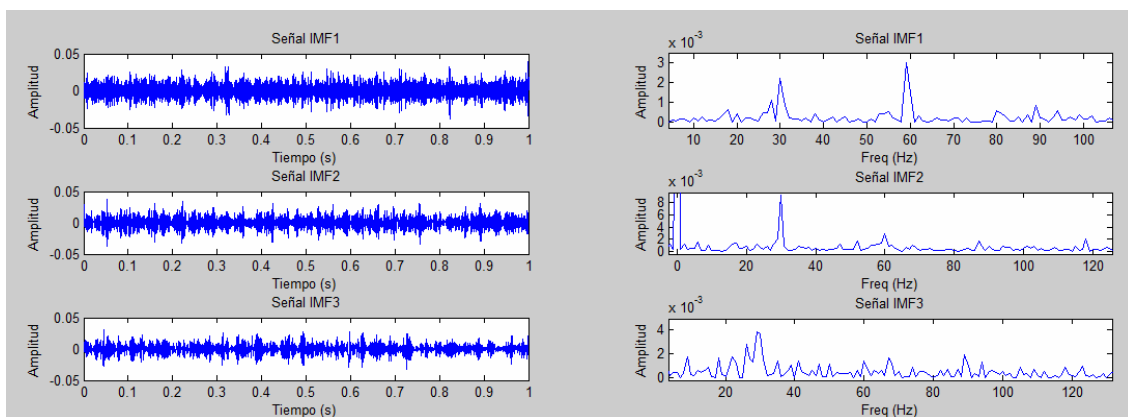


Figura 4-27 Detalle de las 3 primeras IMF de la señal A-30-5000-1

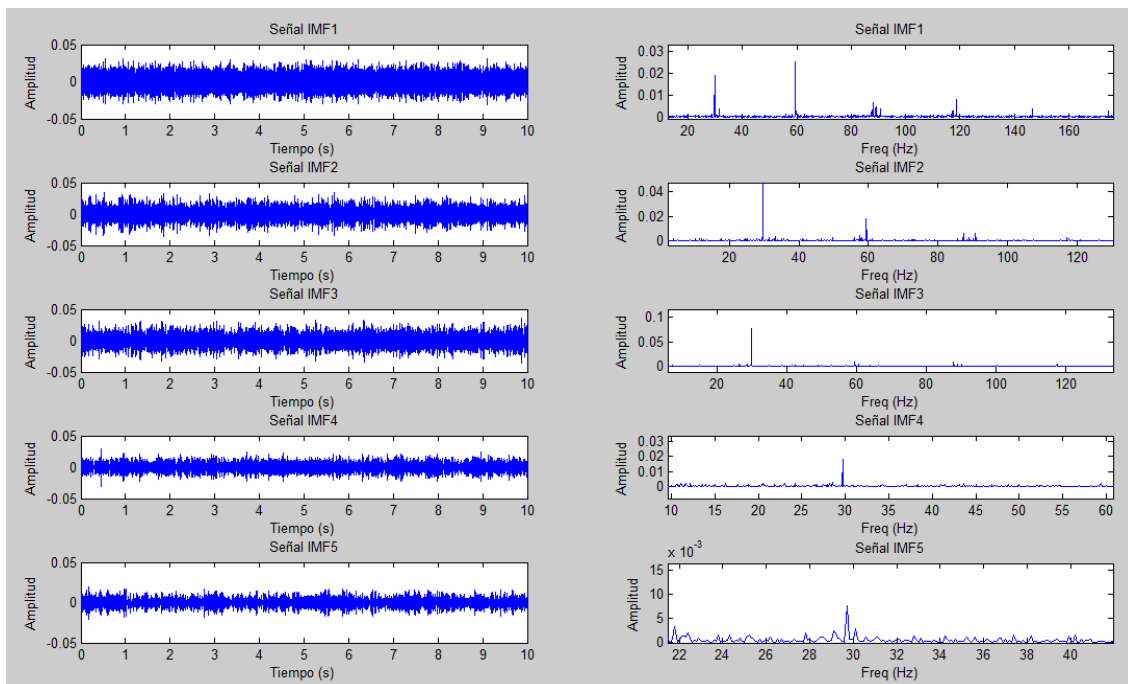


Figura 4-28 Detalle de las 5 primeras IMF de la señal A-30-50000-1

Rodamiento con defecto en bola

En la figura 4-29 se muestra el detalle de la señal B-10-50000-1 que se corresponde con un rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz, al igual que ocurría para el análisis mediante la transformada de Hilbert se distingue un pico de frecuencia en torno a 7.5 Hz. Para comprobar la consistencia de los resultados se repite el análisis para otras dos señales teóricamente iguales, representándose en las figuras 4-30 y 4-31 las señales B-10-50000-3 y B-10-50000-4 respectivamente. Los resultados resultan ser muy parecidos.

Tras un análisis detallado de la primera IMF de la figura 4-31 se obtienen las frecuencias que se muestran en la tabla 4-5. Podemos repetir la explicación del apartado anterior pero hay que tener en cuenta que en este caso la señal se encuentra mucho más filtrada y que conforme vamos obteniendo nuevas IMF las frecuencias menos representativas no se ven, quedando sólo la principal que como ya se dijo es la de 7.5 Hz.

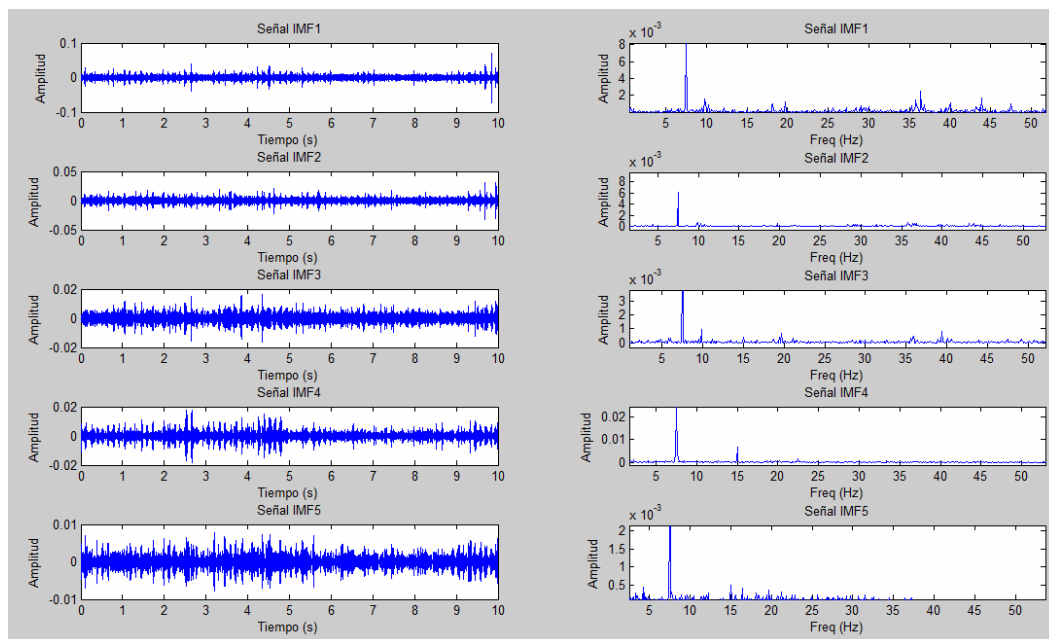


Figura 4-29 Detalle de las 5 primeras IMF para un rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

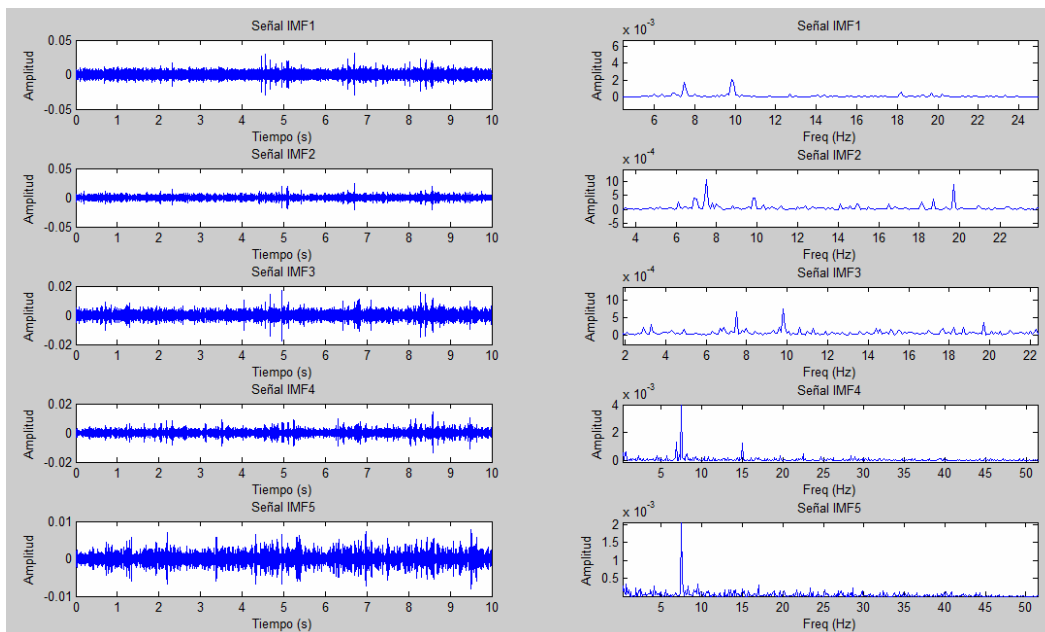


Figura 4-30 Detalle de las 5 primeras IMF de la señal B-10-50000-3

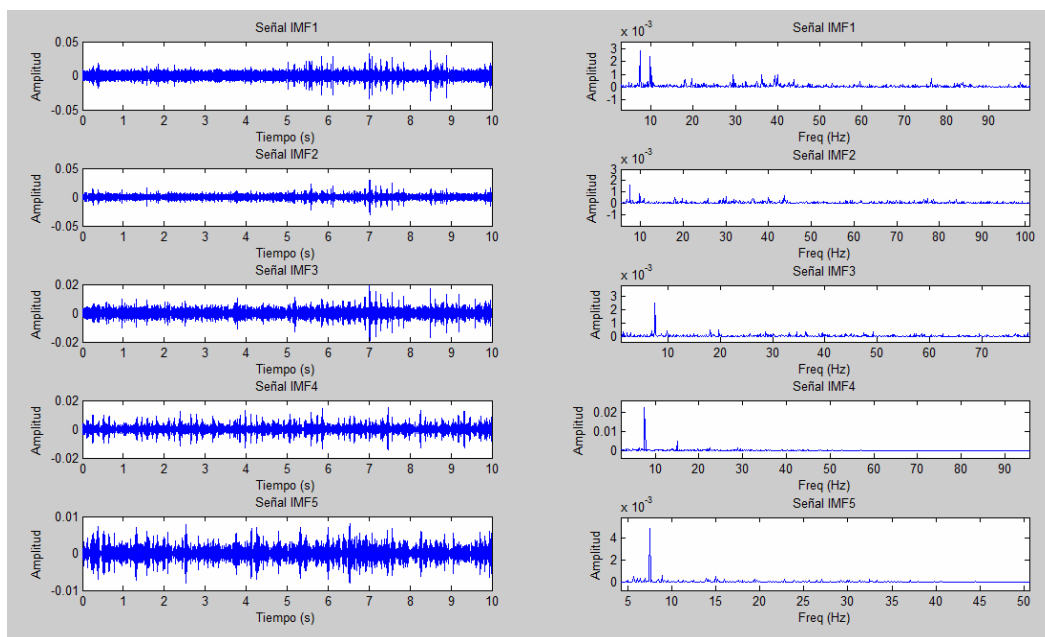


Figura 4-31 Detalle de las 5 primeras IMF de la señal B-10-50000-4

Tabla 4-5 Análisis de frecuencias IMF1 B-10-50000-4

Frecuencia [Hz]	Causa
7.5	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
9.8	Frecuencia de giro (n)
10.3	f2-n
18.1	f1+n
19.7	Frecuencia de defecto en bola (f2)
29.5	f2+n
36.4	f2+f1+n
39.3	2f2

En las figuras 4-32 y 4-33 se muestran los resultados para este mismo rodamiento pero con frecuencias de giro de 20 y 30 Hz respectivamente. Se confirma lo observado con anterioridad, ya que las frecuencias de defecto encontradas son 15 Hz y 22.5 Hz. Al igual que ocurría para este tipo de defecto con la transformada de Hilbert, las frecuencias de giro del eje no se distinguen con demasiada claridad, aun así en este caso pueden adivinarse y esto confirma la validez del método. Las tablas 4-6 y 4-7 resumen una vez más los resultados observados en la primera IMF.

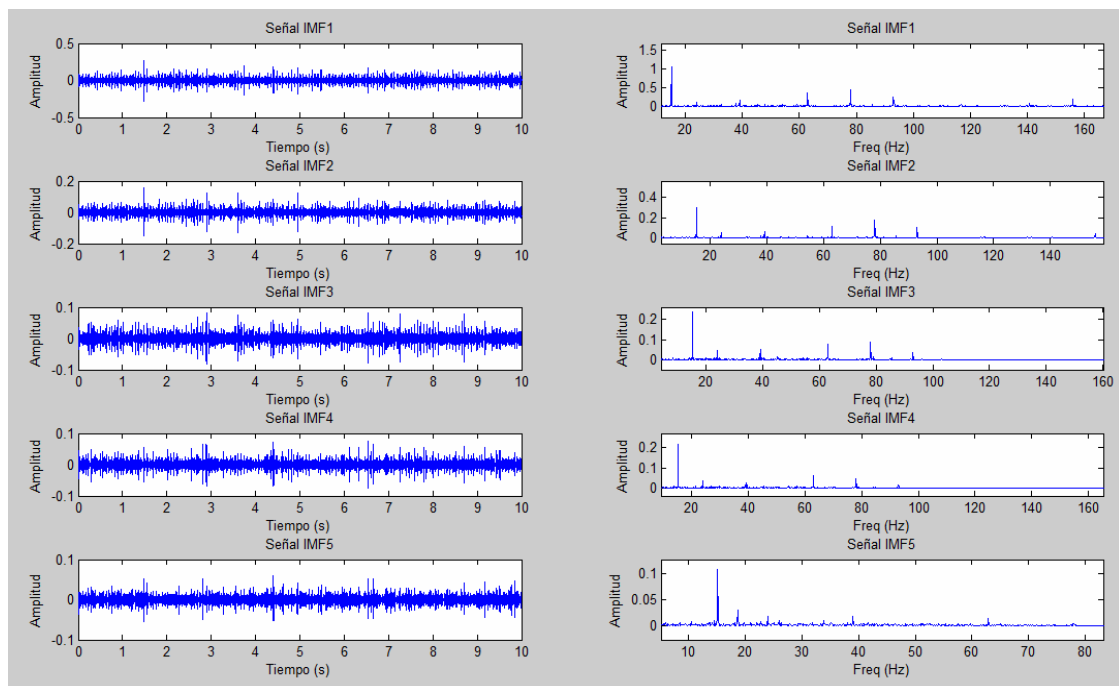


Figura 4-32 Detalle de las 5 primeras IMF para un rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

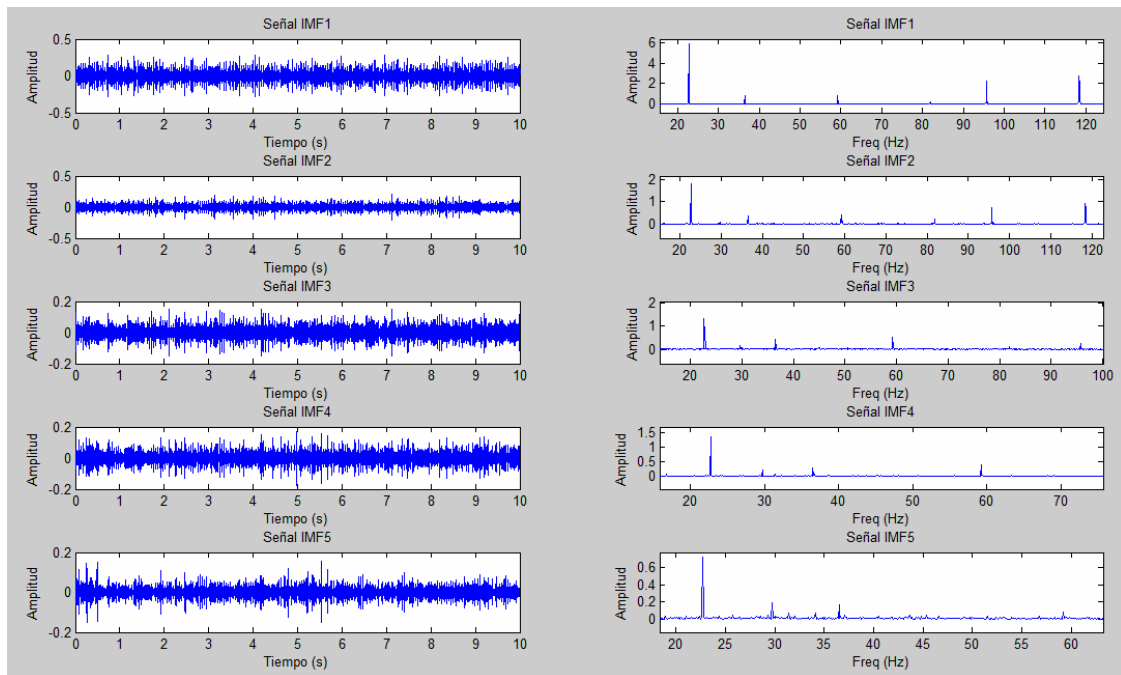


Figura 4-33 Detalle de las 5 primeras IMF para un rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Tabla 4-6 Análisis de frecuencias IMF1 rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
15.1	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
23.9	f2-f1
39	Frecuencia de defecto en bola (f2)
62.9	2f1-f1
77.9	2f2
93	2f2+f1
155.9	4f1

Tabla 4-7 Análisis de frecuencias IMF1 rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
22.7	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
29.7	Frecuencia de giro (n)
36.5	f2-f1
59.2	Frecuencia de defecto en bola (f2)
81.9	f2+f1
95.7	2f2-f1
118.4	2f2
141.2	2f2+f1
214.2	4f2-f1
236.9	4f2
259.6	4f2+f1

Rodamiento con defecto en la pista interna

En las figuras 4-34, 4-35 y 4-36 vemos las IMF de las señales I-10-50000-1, I-20-50000-1 e I-30-50000-1, correspondientes las tres al rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10, 20 y 30 Hz respectivamente. Las frecuencias de defecto esperadas son 50, 100 y 150 Hz. El principal problema es que dichas frecuencias se corresponde con el quinto múltiplo de la frecuencia de giro el eje, pero no parece que estén significativamente amplificadas, en todo caso es el segundo múltiplo el que parece ser mayor que los demás, en éste caso 20, 40 y 60 Hz respectivamente. Es cierto que se puede observar que el quinto múltiplo es algo mayor que el cuarto, este resultado se repite para cualquier método que utilicemos.

Observando las tablas 4-8, 4-9 y 4-10 puede advertirse que utilizando este método el filtrado es mucho mejor, observamos menos picos de frecuencia que con la transformada de Hilbert aplicada directamente sobre los datos, pero en todos los casos la información importante se conserva.

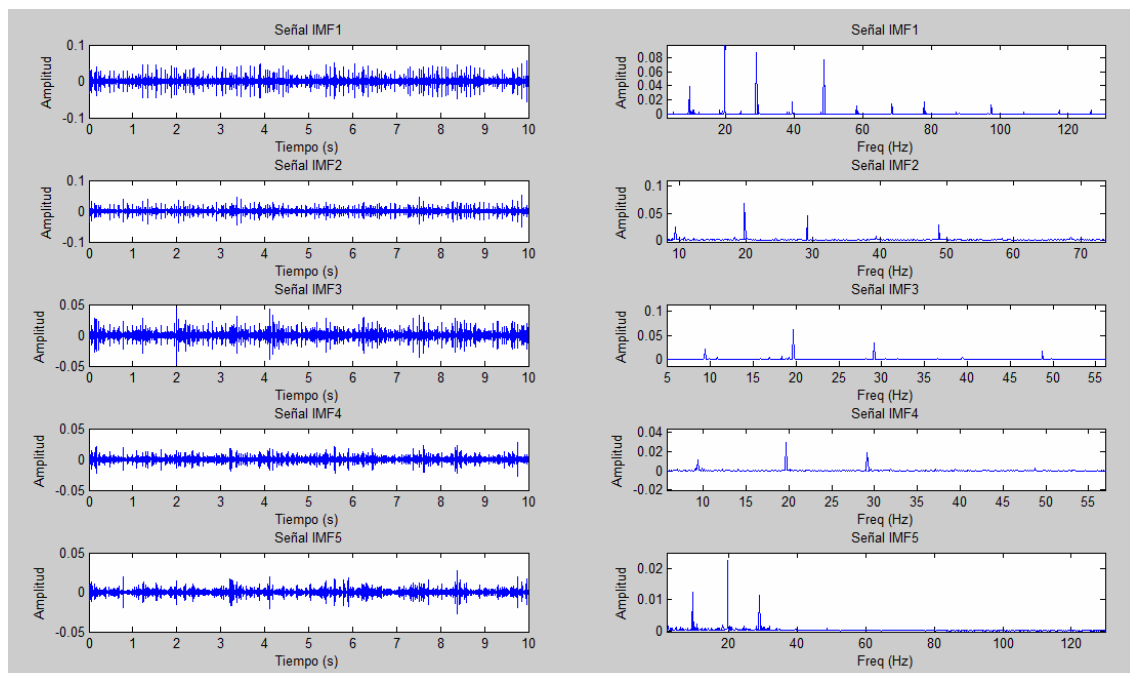


Figura 4-34 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista interna girando a 10 Hz

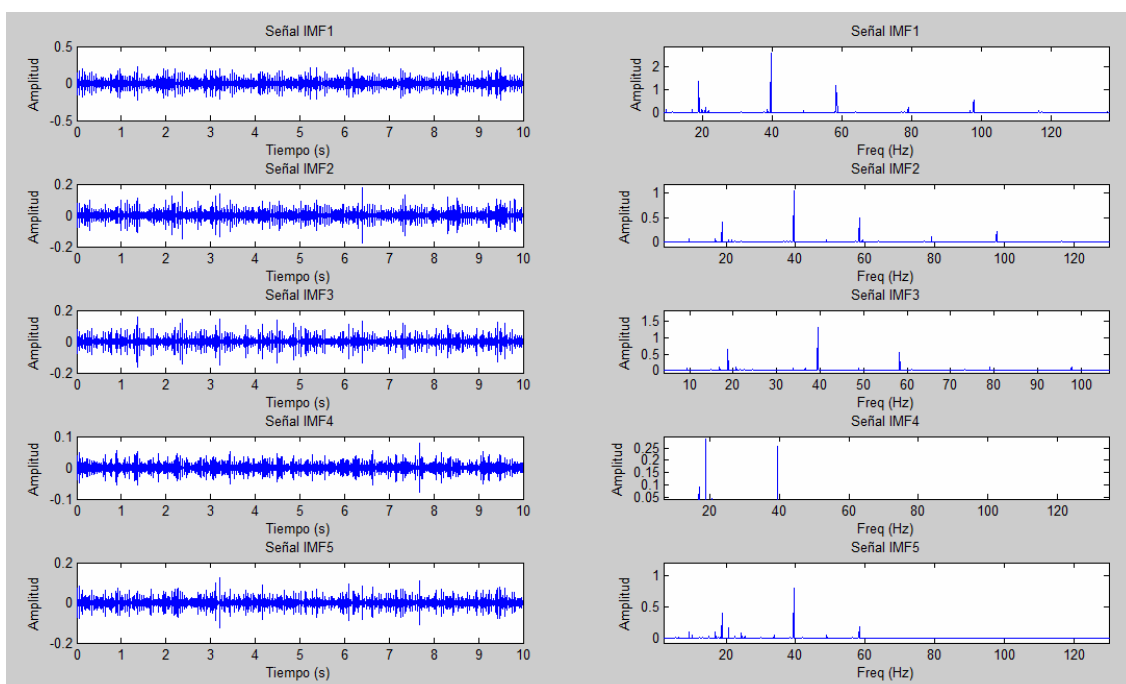


Figura 4-35 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista interna girando a 20 Hz

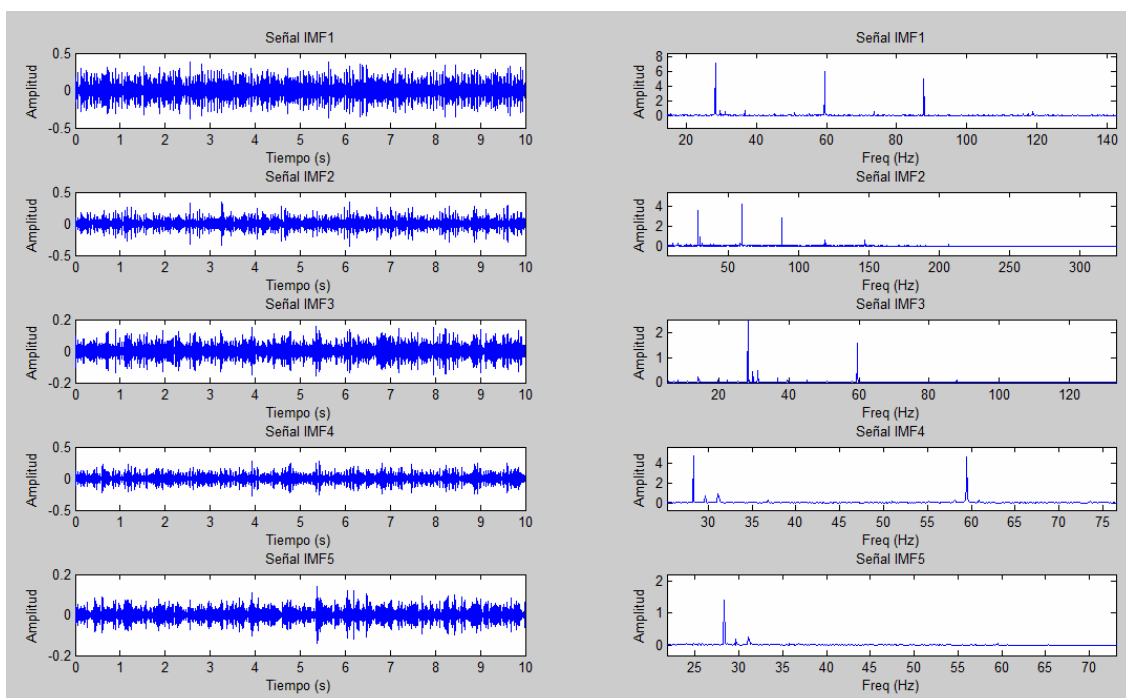


Figura 4-36 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista interna girando a 30 Hz

Tabla 4-8 Análisis de frecuencias IMF1 I-10-50000-1

Frecuencia [Hz]	Causa
9.4	Frecuencia de giro (n)
19.7	Frecuencia de defecto en bola (f1)
29.1	f2-f1
29.6	f2+n
39.4	2f1
48.8	Frecuencia de defecto en la pista interna (f2)
58.2	F2+n
58.7	3f1
68.5	F2+f1
77.9	4f1

Tabla 4-9 Análisis de frecuencias IMF1 I-20-50000-1

Frecuencia [Hz]	Causa
18.8	Frecuencia de giro (n)
39.5	Frecuencia de defecto en bola (f1)
58.3	f2-f1
79	f2-n
97.8	Frecuencia de defecto en la pista interna (f2)
137.2	f2+f1

Tabla 4-10 Análisis de frecuencias IMF1 I-30-50000-2

Frecuencia [Hz]	Causa
28.3	Frecuencia de giro (n)
59.5	Frecuencia de defecto en bola (f1)
87.8	f1+n
147.2	Frecuencia de defecto en la pista interna (f2)

Rodamiento con defecto en la pista externa

En las figuras 4-25, 4-26 y 4-27 vemos las IMF de las señales O-10-50000-1, O-20-50000-1 e O-30-50000-1, correspondientes las tres al rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10, 20 y 30 Hz. Las frecuencias de defecto esperadas son 30, 60 y 90 Hz. Utilizando la transformada de *Hilbert* habíamos sido capaces de encontrar dichas frecuencias, se puede observar a partir de las imágenes que los resultados positivos se repiten para la transformada de *Hilbert-Huang*.

La primera conclusión que se puede extraer del análisis es que las frecuencias de defecto se ven con mucha más claridad en rodamientos con defecto en la pista externa.

Además, como se desprende de las tablas 4-11, 4-12 y 4-13, el filtrado es mucho mejor que con el método anterior, conservándose únicamente los picos correspondientes a la frecuencia de defecto y la frecuencia de giro del motor.

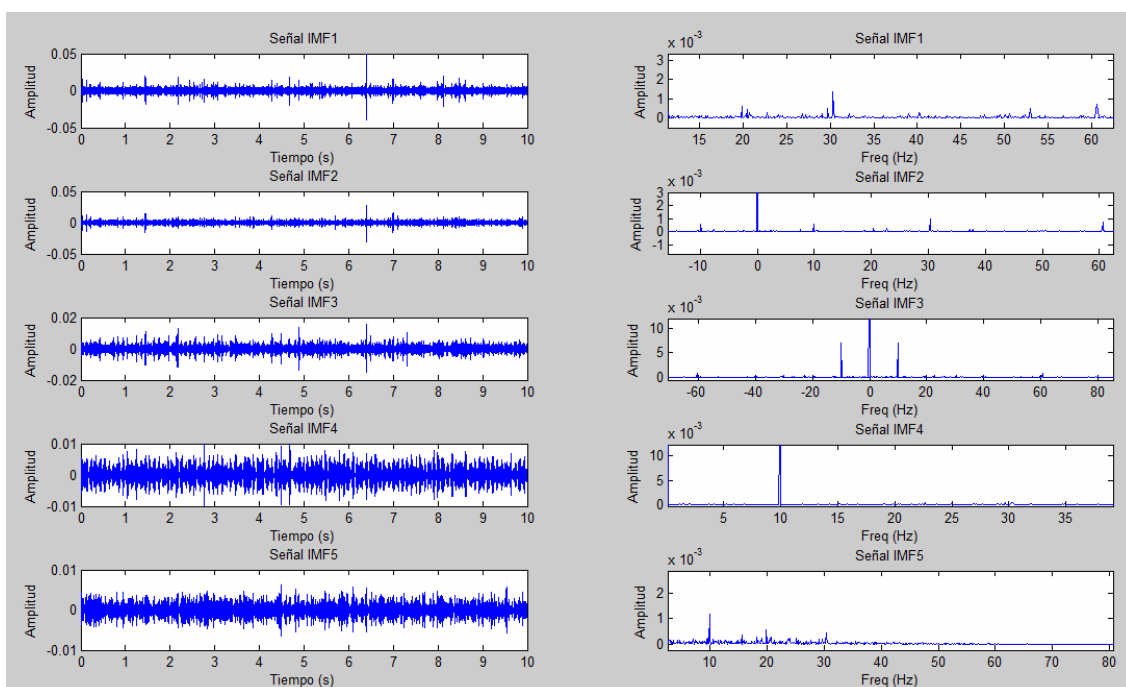


Figura 4-37 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista externa a 10 Hz

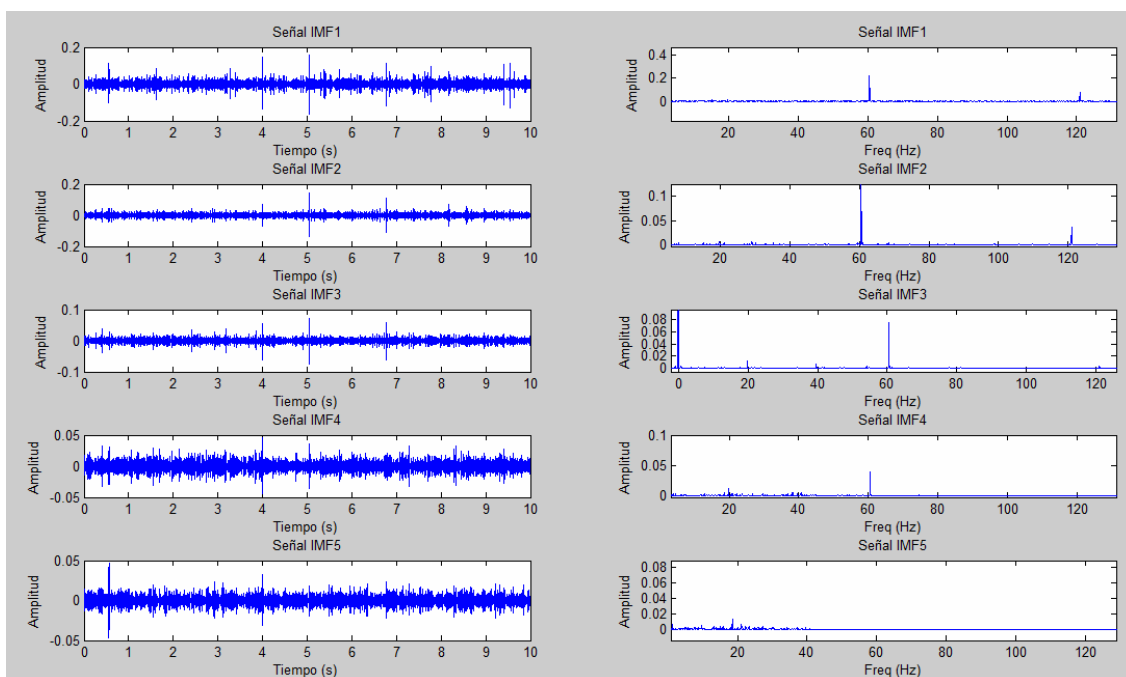


Figura 4-38 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista externa a 20 Hz

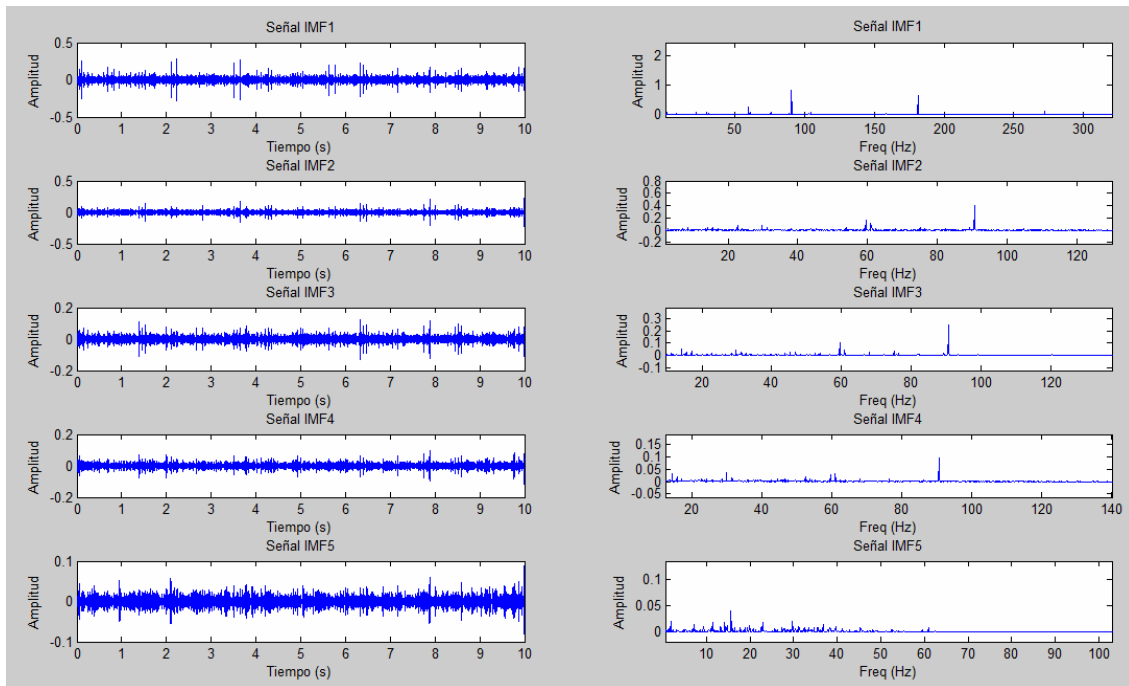


Figura 4-39 Detalle de las 5 primeras IMF, rodamiento con defecto en pista externa a 30 Hz

Tabla 4-11 Análisis de frecuencias IMF1 O-10-50000-1

Frecuencia [Hz]	Causa
9.9	Frecuencia de giro (n)
19.8	2n
20.4	f1-n
29.7	3n
30.3	Frecuencia de defecto en la pista exterior (f1)
60.6	2f1
90.8	3f1

Tabla 4-12 Análisis de frecuencias IMF1 O-20-50000-1

Frecuencia [Hz]	Causa
60.5	Frecuencia de defecto en la pista exterior (f1)
121	2f1
181.6	3f1

Tabla 4-13 Análisis de frecuencias IMF1 O-30-50000-1

Frecuencia [Hz]	Causa
29.7	Frecuencia de giro (n)
59.5	2n
90.7	Frecuencia de defecto en la pista exterior (f1)
181.3	2f1

En la tabla 4-14 volvemos a resumir los resultados obtenidos, en todos los casos la frecuencia a la que se encuentra el defecto es la misma que con la transformada de *Hilbert*, la única diferencia reside en la amplitud de éste, que parece ser mucho menor al aplicar la transformada de *Hilbert-Huang*.

Tabla 4-14 Frecuencias encontradas mediante transformada de Hilbert-Huang

Defecto	Frecuencias de giro	Frecuencia de defecto encontrada	Error	Amplitud	Amplitud máxima
BOLAS	10	19.7	1.069%	9.50E-04	0.02
	20	39	2.106%	0.17	1.05
	30	59.2	0.899%	0.88	5.90
PISTA INTERNA	10	48.8	1.395%	0.08	0.10
	20	97.8	1.187%	0.53	2.57
	30	147.2	0.844%	1.84	7.10
PISTA EXTERNA	10	30.3	0.724%	1.30E-03	2.20E-02
	20	60.5	0.891%	0.22	0.22
	30	90.7	0.946%	0.81	0.81

4.4 CYCLE SPINNING

Tras descomponer en 3 niveles las señales con el esquema de *lifting* redundante (RLS) usando el algoritmo conocido como *cycle spinning* se le aplica la transformada de Hilbert a cada una de las señales de detalle obteniéndose los diferentes espectros de frecuencias. No aporta ninguna información extra representar todas las señales de detalle de cada nivel, se va a hacer una media entre todas las señales de cada nivel, de manera que se represente una señal por nivel de descomposición.

Rodamiento no defectuoso

Se ha estudiado las señales A-10-5000-1, A-10-50000-1, A-20-5000-1, A-20-50000-1, A-30-5000-1 y A-30-50000-1 los resultados se presentan de la figura 4-40 a la 4-45.

El objetivo del análisis es comprobar, no sólo la validez del método, sino también la influencia del número de muestras; ya que como se puede observar se ha seleccionado dos señales por cada velocidad de giro, una de 5000 muestras y otra de 50000.

Como se puede ver en la figura 4-40 las frecuencias de giro del eje están muy poco amplificadas y se confunden con otro ruido existente; pero si miramos el espectro correspondiente al primer nivel de descomposición veremos que es posible distinguir un pequeño pico de frecuencia en 10 Hz y sus múltiplos.

Ya en la figura 4-41, correspondiente con la señal de 50000 muestras se distingue con claridad la frecuencia de giro y sus múltiplos, por lo tanto la primera impresión es que al aumentar el número de muestras desaparecerá el problema de ruido a frecuencias bajas que teníamos con señales de pocas muestras.

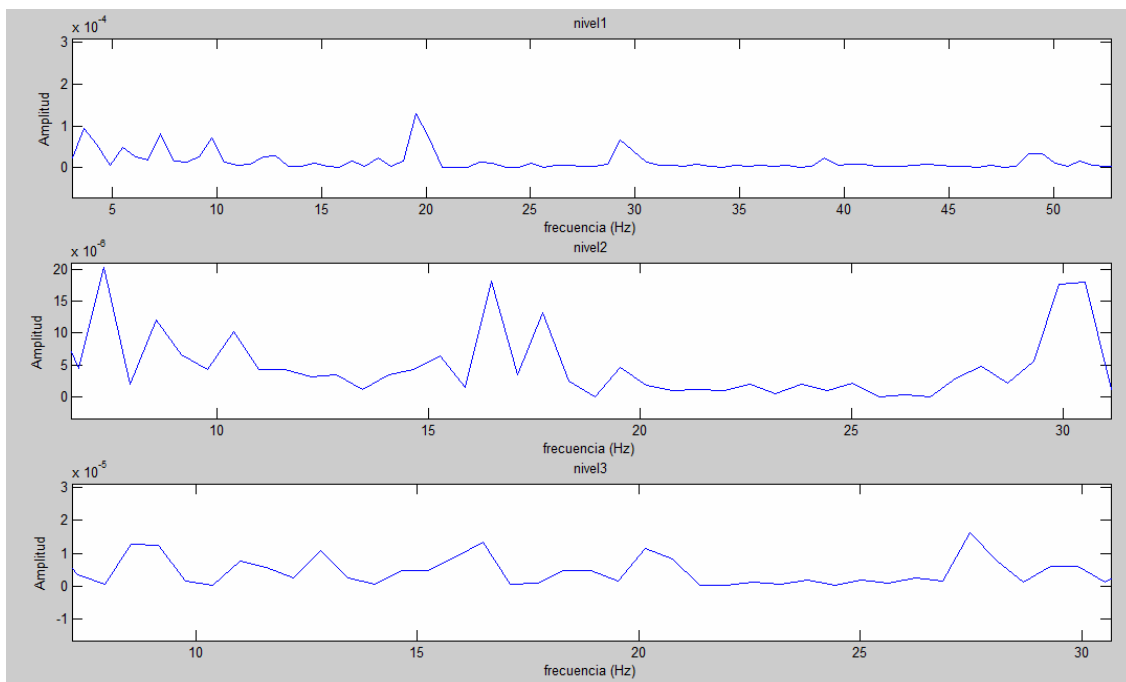


Figura 4-40 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz, señal de 5000 muestras

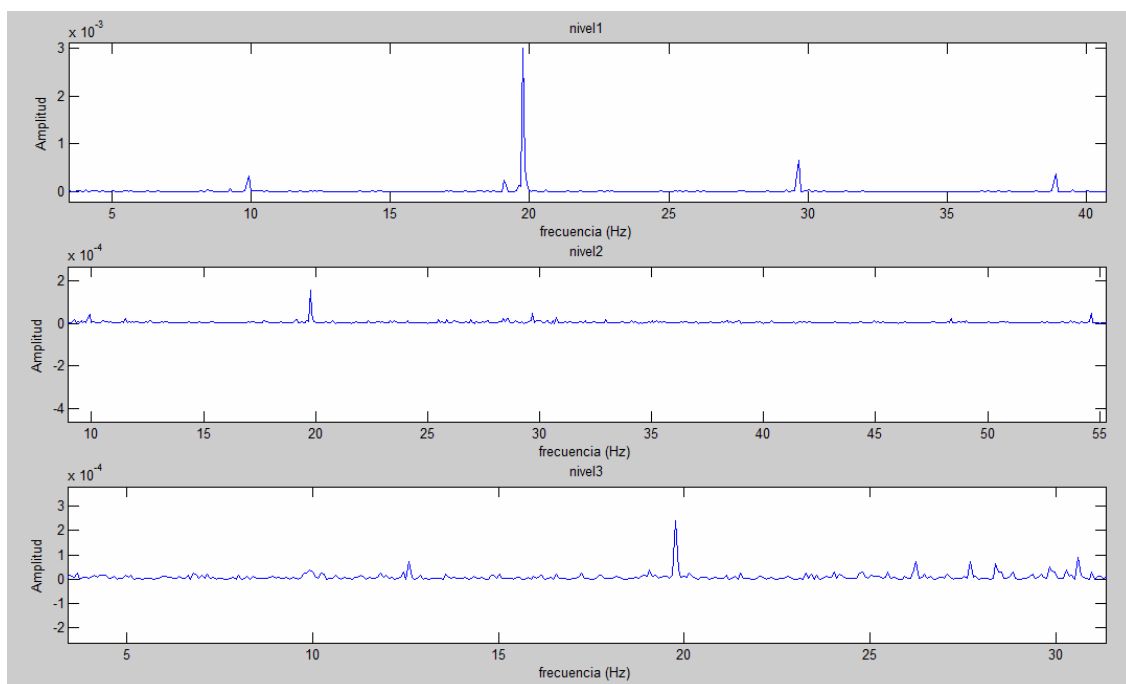


Figura 4-41 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 10 Hz, señal de 50000 muestras

En la figura 4-42 podemos ver con mucha más claridad los picos de frecuencia en 20 y 40 Hz, pero una vez más conforme avanzamos en niveles de descomposición el ruido existente no es filtrado de manera correcta y se confunde con la frecuencia de giro.

Igual que para la señal de 10 Hz, este problema no existe al aumentar el número de muestras.

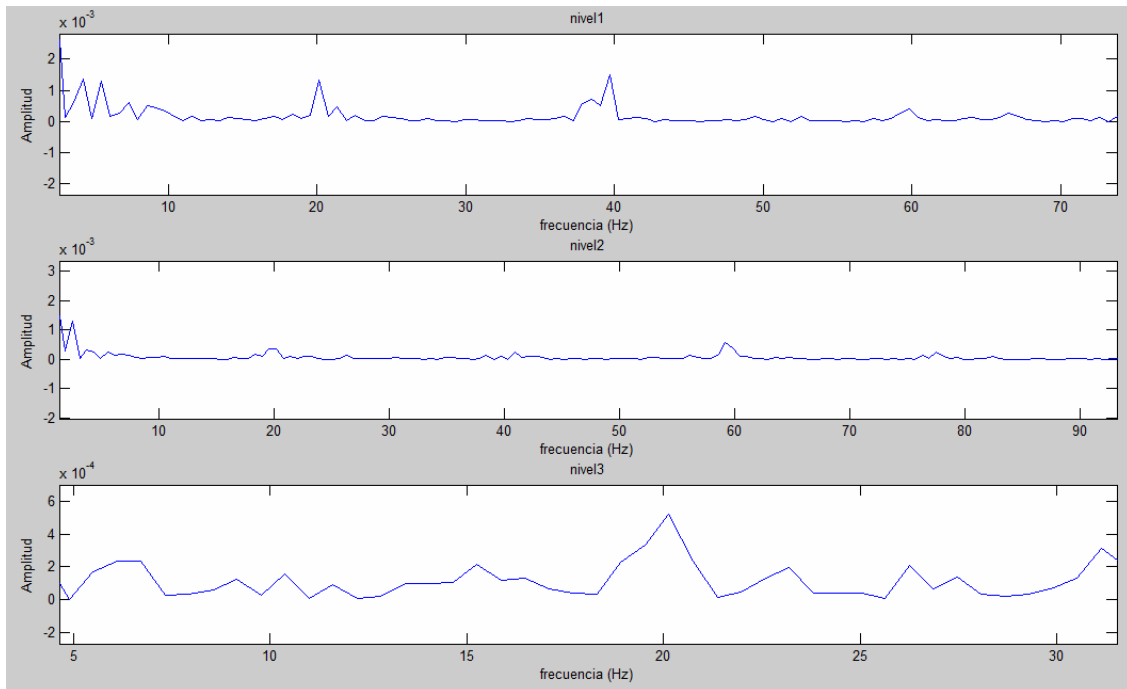


Figura 4-42 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz, señal de 5000 muestras

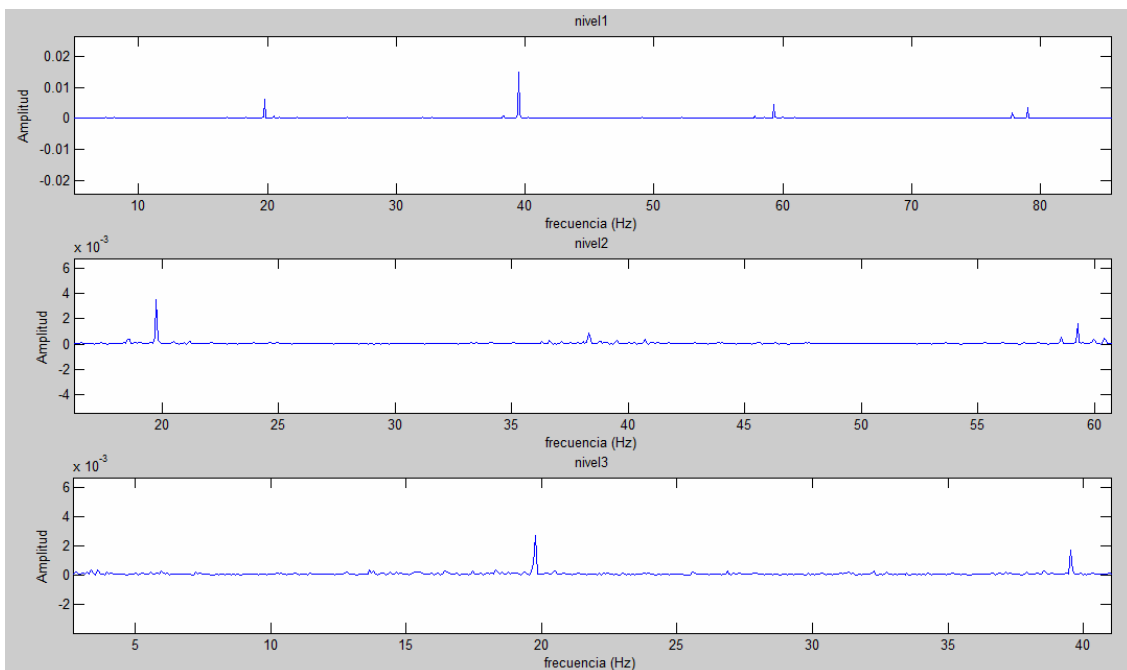


Figura 4-43 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 20 Hz, señal de 50000 muestras

De las figuras 4-44 y 4-45 podemos decir lo mismo, en el primer nivel la frecuencia de 60 Hz, múltiplo de la de giro del motor, es la más amplificada. En los siguientes volvemos a encontrarnos con la frecuencia de 60 Hz pero la de 30 Hz parece cobrar más importancia.

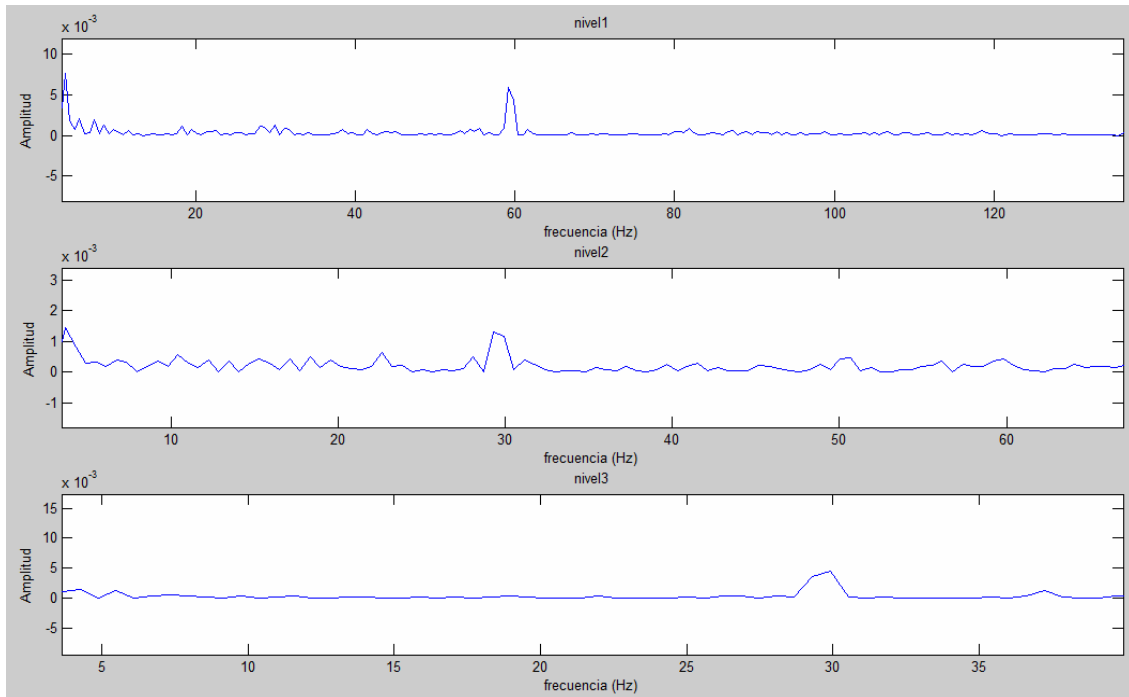


Figura 4-44 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz, señal de 5000 muestras

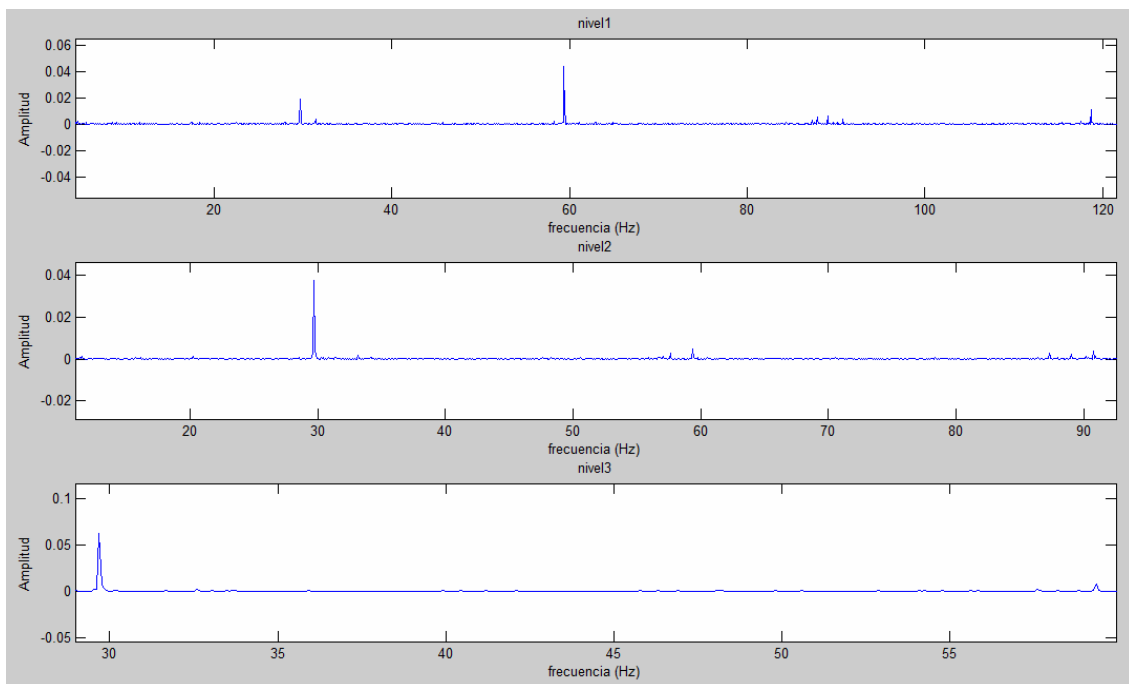


Figura 4-45 RLS, Rodamiento sin defecto girando a 30 Hz, señal de 50000 muestras

Teniendo en cuenta los resultados, de ahora en adelante se trabajará con señales de 50000 muestras.

Rodamiento con defecto en bola

Se ha analizado las señales B-10-50000-1, B-20-50000-1 Y B-30-50000-1, todas ellas con 50000 muestras, los resultados se presentan de la figura 4-46 a la 4-48.

Volvemos a encontrarnos en todos los casos con la frecuencia que hemos atribuido a un defecto en la jaula. Al aumentar la velocidad de giro se amplifica el segundo múltiplo de la frecuencia de defecto en bola, haciéndose más visible con respecto a la frecuencia mencionada anteriormente.

Volvemos a presentar las frecuencias encontradas en tablas, los resultados son muy parecidos a los obtenidos por métodos anteriores.

Al igual que ocurría con la descomposición modal, utilizando este método obtenemos señales más limpias que simplemente aplicando la transformada de Hilbert sobre la señal inicial.

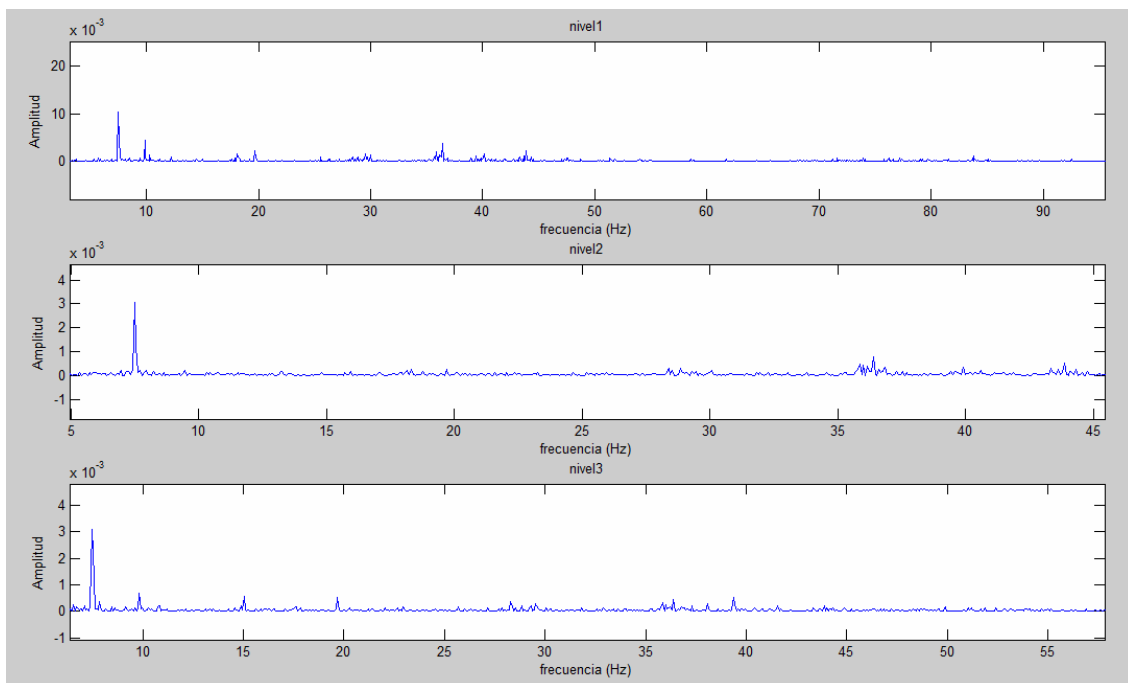


Figura 4-46 RLS, Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

Tabla 4-15 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en bola girando a 10 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
7.5	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
9.8	Frecuencia de giro (n)
10.3	f2-n
18.1	f1+n
19.7	Frecuencia de defecto en bola (f2)
29.5	f2+n
30	4f1
36.4	f2+f1+n
39.4	2f2

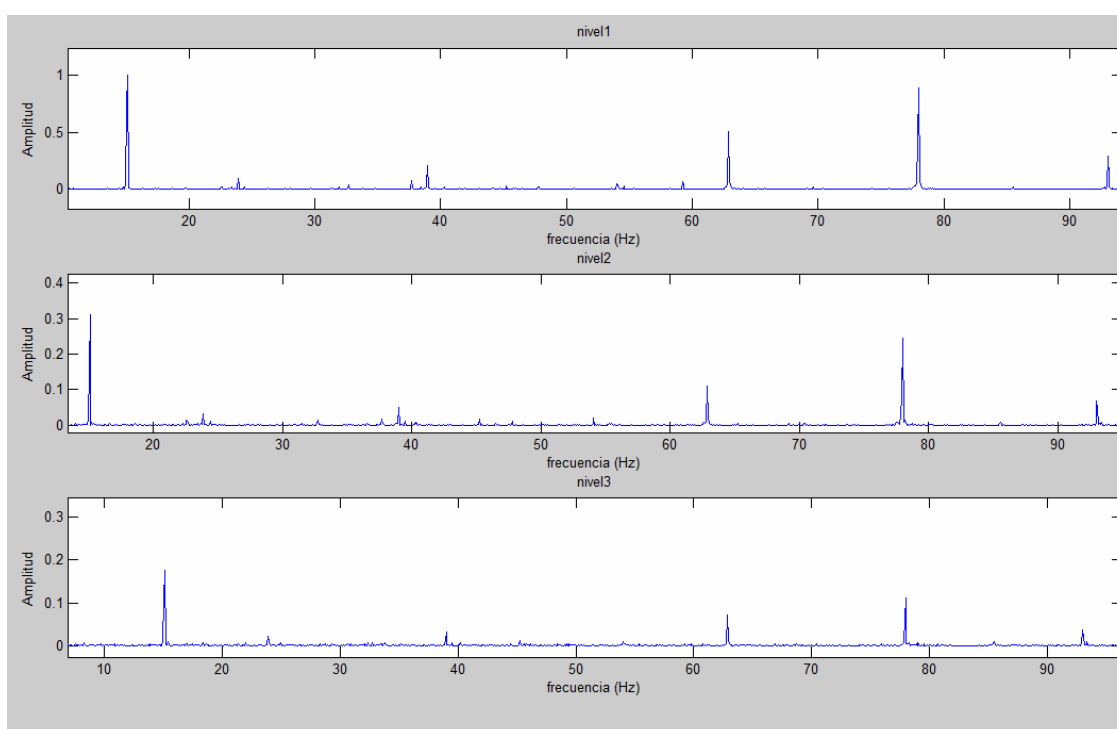


Figura 4-47 RLS, Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

Tabla 4-16 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en bola girando a 20 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
15	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
23.9	f2-f1
39	Frecuencia de defecto en bola (f2)
62.9	2f2-f1
78	2f2
93	2f2+f1
140.9	4f2-f1
156	4f2
170.9	4f2+f1

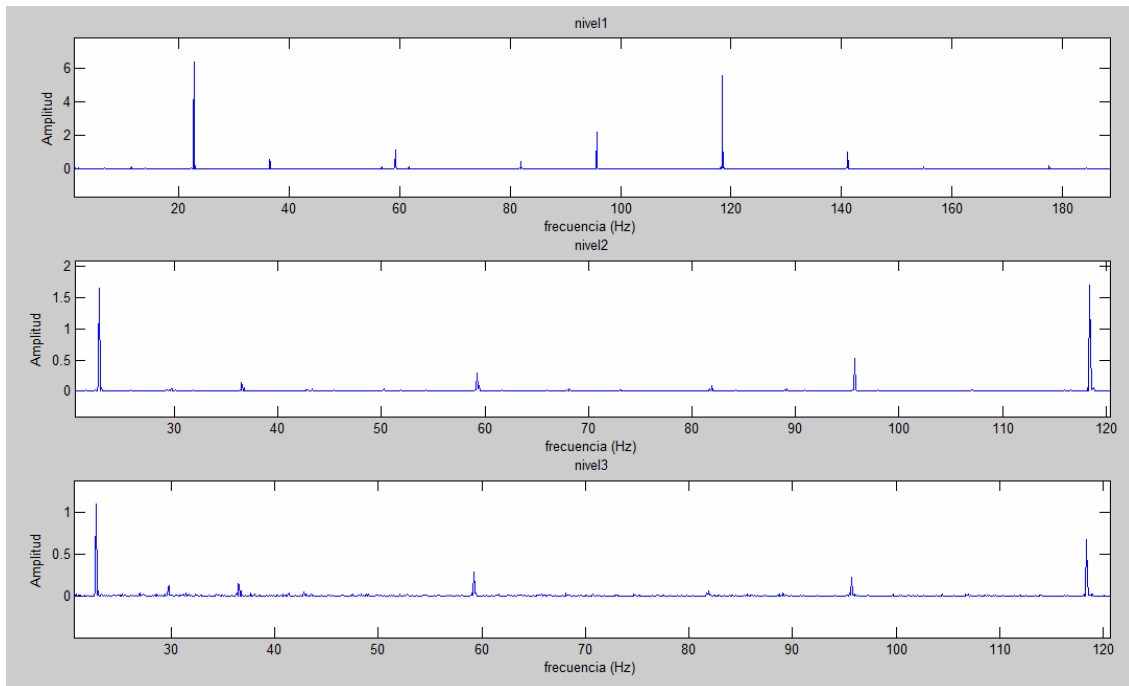


Figura 4-48 RLS, Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Tabla 4-17 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en bola girando a 30 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
22.7	Frecuencia de defecto en la jaula (f1)
36.5	$f2-f1$
59.2	Frecuencia de defecto en bola (f2)
81.9	$f2+f1$
95.7	$2f2-f1$
118.4	$2f2$
141.1	$2f2+f1$

Hay que destacar que en todos los casos se han estudiado las frecuencias del primer nivel de descomposición, ya que son las que más información aportan. Avanzando en los niveles nos encontramos con menos picos de frecuencia, conservándose sólo los más destacados y siendo de mayor utilidad para distinguir de un vistazo las frecuencias características de un rodamiento.

Rodamiento con defecto en la pista interna

Se han analizado las señales I-10-50000-1, I-20-50000-1 Y I-30-50000-1, que se corresponden con rodamientos con defecto en la pista interna girando a 10, 20 y 30 Hz, los resultados se presentan de la figura 4-49 a la 4-51.

En todos los casos se observa con bastante claridad la existencia de picos de frecuencia múltiplos de la frecuencia de giro, igual que en los apartados anteriores esperábamos que el quinto múltiplo de la frecuencia de defecto estuviera amplificado, pero es el segundo el que es mucho mayor que los demás. La explicación de que haya no sólo un defecto en la pista interna, sino también uno en bola es válida una vez más.

Las señales son muy limpias, y prácticamente todos los picos de frecuencia observados pueden atribuirse a una causa concreta, no afectando para nada la existencia de ruido, que parece haber sido filtrado por completo.

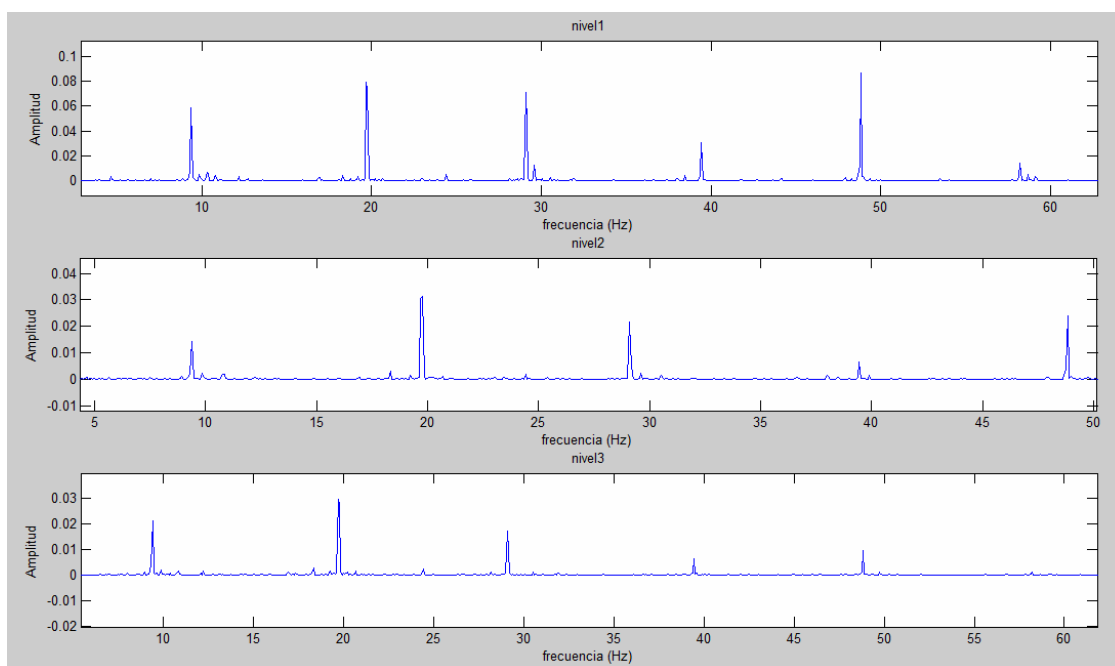


Figura 4-49 RLS, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10 Hz

Tabla 4-18 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 10 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
9.4	Frecuencia de giro (n)
10.3	$f_1 - n$
19.7	Frecuencia de defecto en bola (f_1)
29.1	$f_2 - f_1$
39.5	$f_2 - n$
48.8	Frecuencia de defecto en la pista interna (f_2)
58.2	$f_2 + n$
59.1	$f_2 + f_1 - n$
68.5	$f_2 + f_1$
77.9	$f_2 + f_1 + n$
97.7	$2f_2$

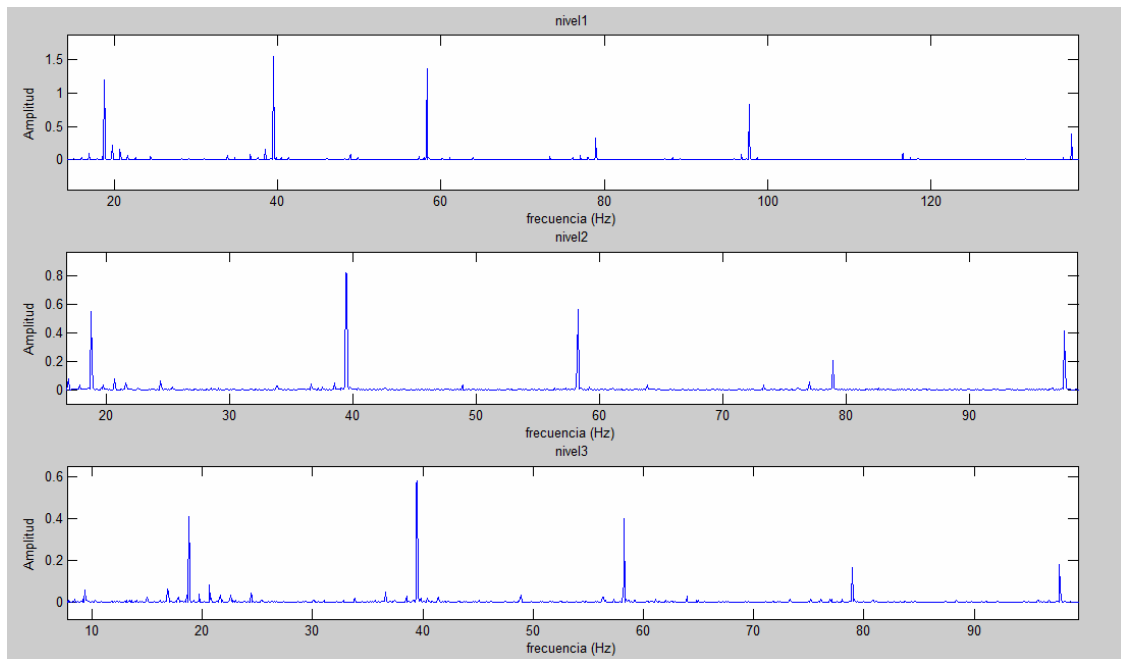


Figura 4-50 RLS, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 20 Hz

Tabla 4-19 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 20 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
18.8	Frecuencia de giro (n)
39.5	Frecuencia de defecto en bola (f1)
58.3	f2-f1
79	f2-n
97.7	Frecuencia de defecto en la pista interna (f2)

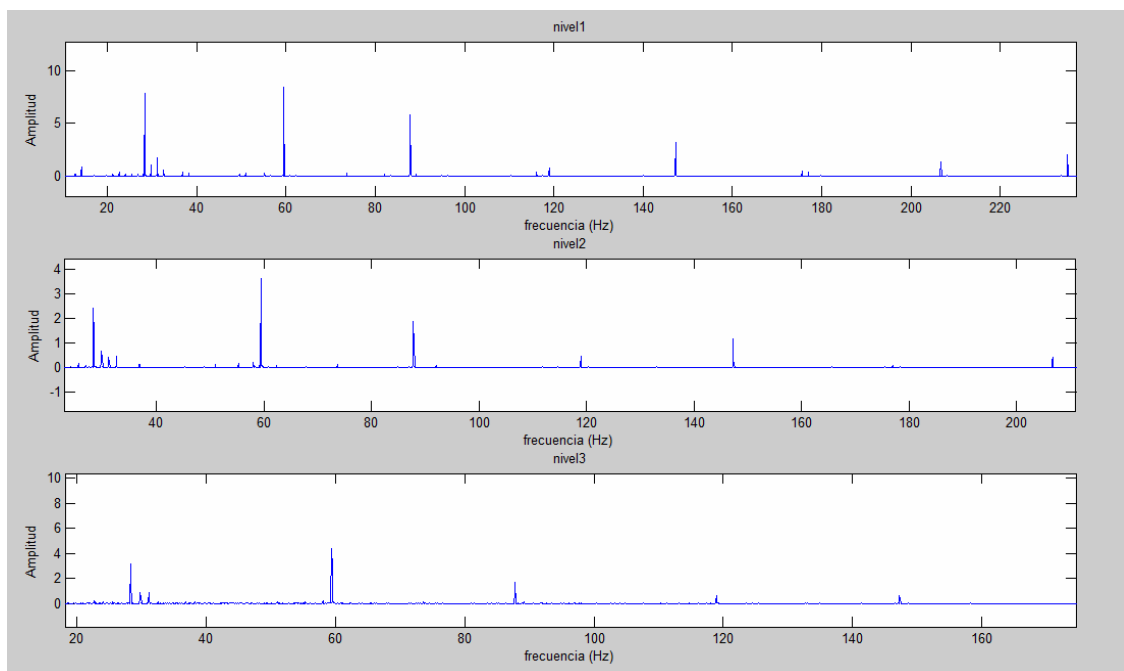


Figura 4-51 RLS, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 30 Hz

Tabla 4-20 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista interna girando a 30 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
28.3	Frecuencia de giro (n)
31.1	$f_1 - n$
59.4	Frecuencia de defecto en bola (f_1)
87.8	$f_2 - f_1$
118.9	$f_2 - n$
147.2	Frecuencia de defecto en la pista interna (f_2)
206.7	$f_2 + f_1$
235.1	$2f_2 - f_1$
294.5	$2f_2$

Rodamiento con defecto en la pista externa

Se ha estudiado las señales O-10-50000-1, O-20-50000-1 Y O-30-50000-1, disponiendo una vez más de una muestra para cada velocidad de giro. Los resultados se presentan de la figura 4-52 a la 4-54 y en las tablas de la 4-21 a la 4-23.

En la figura 4-52 nos encontramos con la frecuencia de defecto esperada, pero ésta se confunde bastante con el ruido existente. En las señales de detalle del tercer nivel de descomposición se resaltan mejor las frecuencias bajas y somos capaces de ver la frecuencia de 10 Hz correspondiente con la frecuencia de giro del eje.

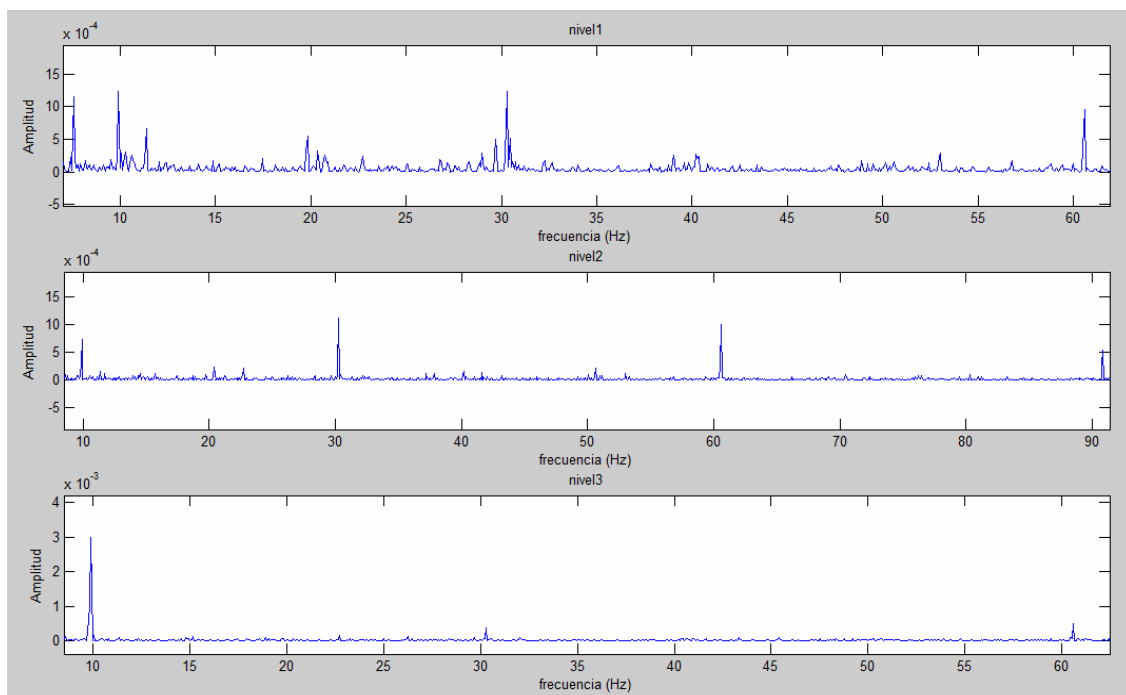


Figura 4-52 RLS, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz

Tabla 4-21 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
9.9	Frecuencia de giro (n)
30.3	Frecuencia de defecto en la pista exterior (f1)
60.6	2f1
90.9	3f1

En la 4-53 nos encontramos con una frecuencia de defecto bastante marcada, todavía es posible distinguir la frecuencia de giro del eje en torno a 20 Hz.

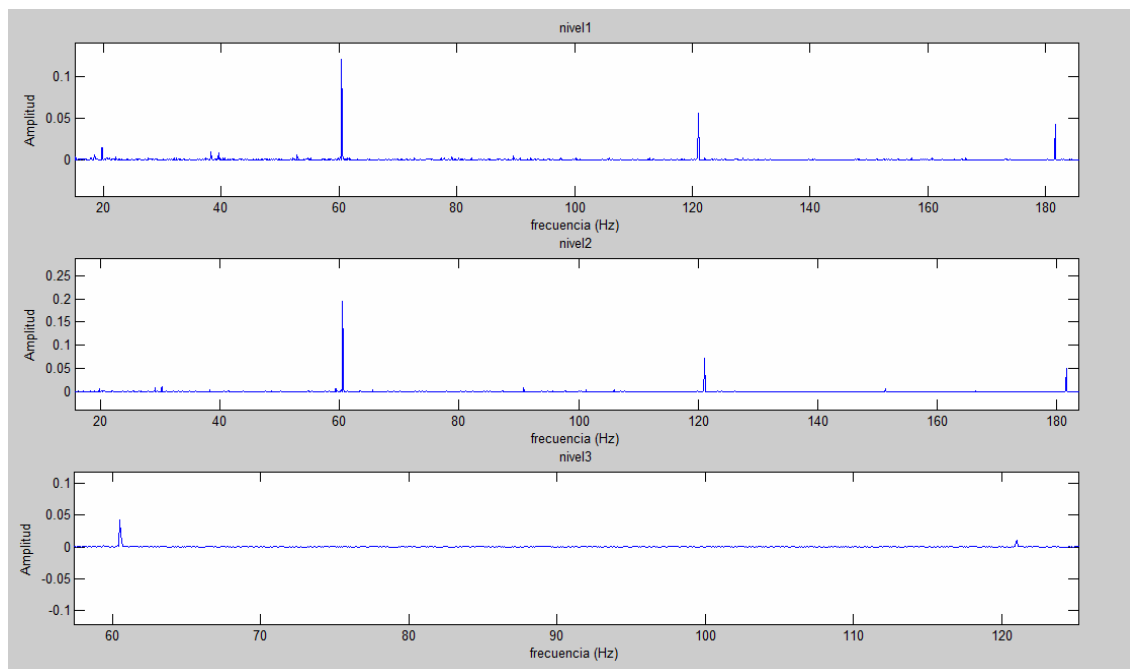


Figura 4-53 RLS, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz

Tabla 4-22 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
19.8	Frecuencia de giro (n)
39.6	2n
60.5	Frecuencia de defecto en la pista exterior (f1)
121	2f1
181.6	2f2

En la figura 4-54 nos encontramos con la frecuencia de defecto en 90.6 Hz y varios de sus múltiplos. A partir del segundo nivel de descomposición la frecuencia de giro del eje queda oculta.

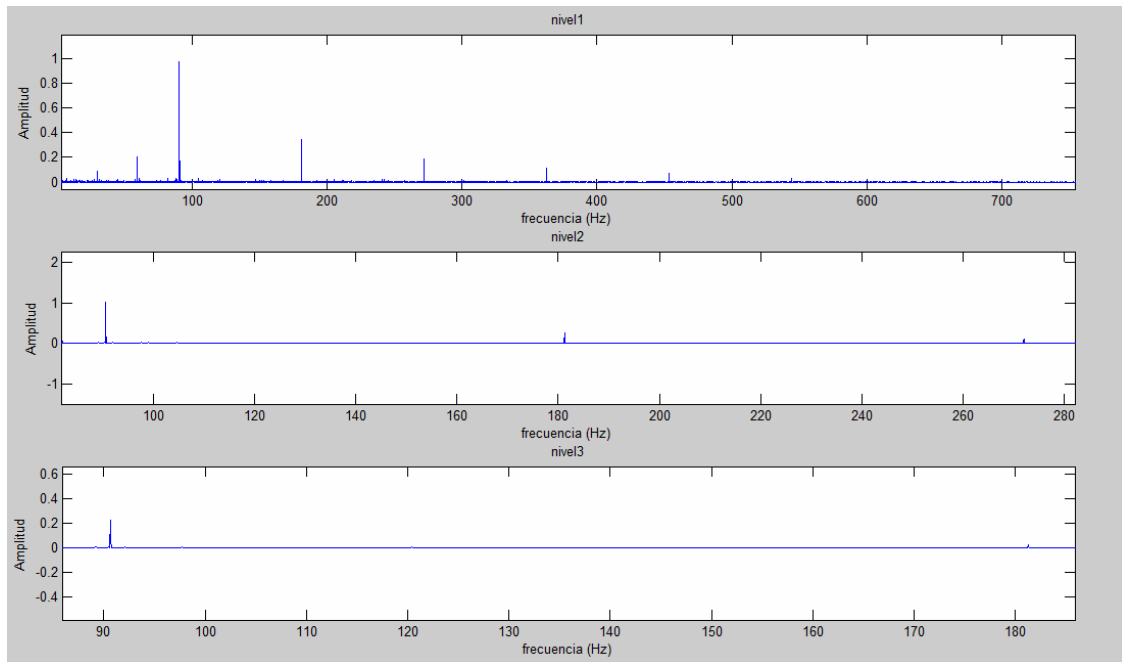


Figura 4-54 RLS, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz

Tabla 4-23 Análisis de frecuencias, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz

Frecuencia [Hz]	Causa
29.7	Frecuencia de giro (n)
59.5	2n
90.6	Frecuencia de defecto en la pista exterior (f1)
181.3	2f1
272	3f1
363.6	4f1
453.3	5f1
543.9	6f1

Una vez más presentamos un resumen de los resultados obtenidos por este método en la tabla 4-24. No existen casi diferencias en los valores de las frecuencias encontradas, pero si en sus amplitudes.

Tabla 4-24 Frecuencias encontradas mediante Esquema de Lifting Redundante

Defecto	Frecuencias de giro	Frecuencia de defecto encontrada	Error	Amplitud	Amplitud máxima
BOLAS	10	19.7	1.069%	2.20E-03	0.10
	20	39.00	2.106%	0.21	1.00
	30	59.20	0.899%	1.17	6.36
PISTA INTERIOR	10	48.80	1.395%	0.09	0.09
	20	97.70	1.291%	0.82	1.50
	30	147.20	0.844%	3.20	8.50
PISTA EXTERIOR	10	30.30	0.724%	1.30E-03	3.00E-03
	20	60.50	0.891%	0.19	0.19
	30	90.60	1.058%	0.97	0.97

5. APLICACIÓN DEL MÉTODO SHOCK PULSE

Una vez preparada la señal pasamos a utilizar el método *shock pulse* (SPM) para determinar de manera automática la existencia o no de defecto. En la figura 5-1 se puede observar un diagrama de flujo del método utilizado. Una vez se ha obtenido el espectro en frecuencias de la señal por cualquiera de los métodos utilizados en el apartado anterior, se calcula el valor normalizado, si algún valor supera los 35 dB la salida del programa para dicha señal será una S que indica que si hay defecto, si no hay ningún valor por encima la salida será una N.

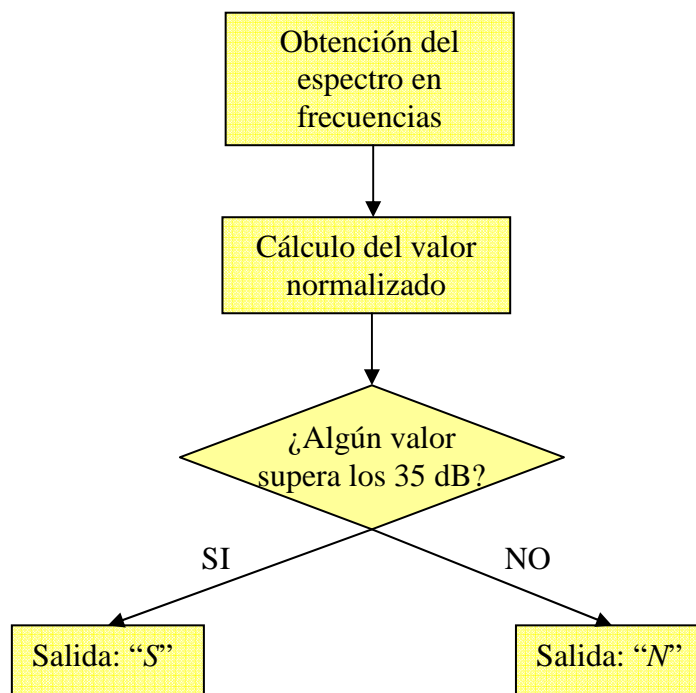


Figura 5-1 Diagrama de flujo para el método *shock pulse*

5.1 TRANSFORMADA DE HILBERT

Lo primero que se hizo fue calcular el valor de choque normalizado según la ecuación 2.28 para después comprobar la existencia o no de valores que superen el valor crítico de 35 dB. El resultado se muestra en las figuras de la 5-1 a la 5-4. Como se puede ver en la figura 5-2 correspondiente al rodamiento no defectuoso, para las dos frecuencias de giro más bajas no hay ningún valor que supere la línea roja que marca los 35 dB, exceptuando por supuesto el máximo en el 0 que debe ser despreciado en lo que sigue. En lo que se refiere a la frecuencia de giro de 30 Hz ya aparece un valor que

supera los 35 dB, esto hace pensar que el valor depende de la velocidad de giro y por lo tanto la ecuación no es correcta.

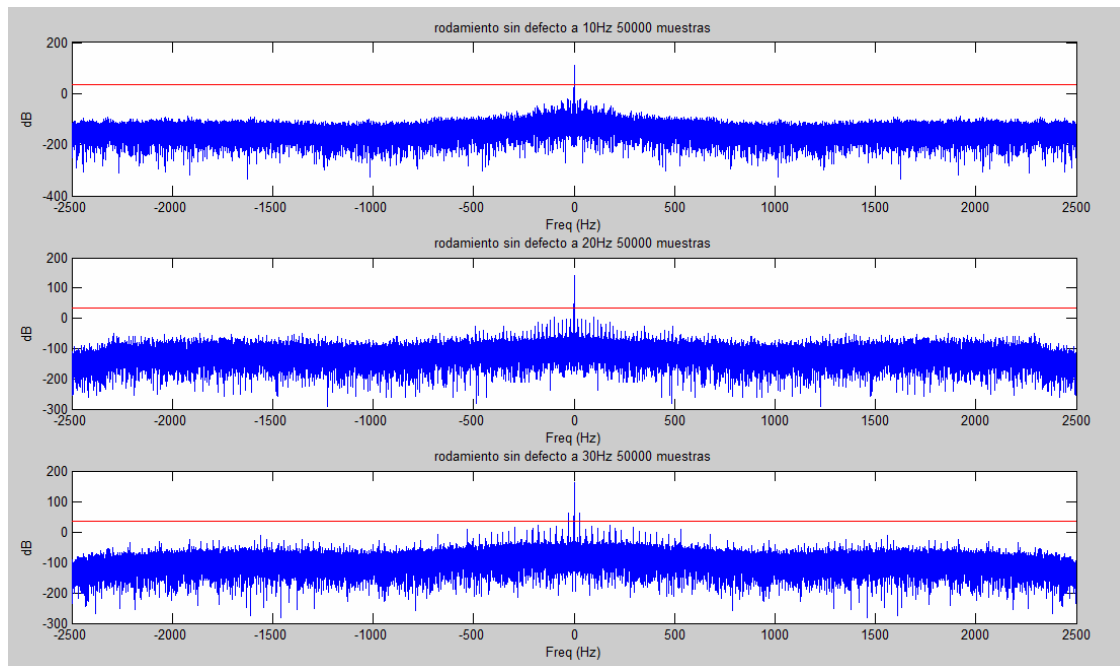


Figura 5-2 Hilbert-SPM, Rodamiento sin defecto

En la figura 5-3, correspondiente al rodamiento con fallo en bola, vemos que no hay ningún valor para la frecuencia de giro de 10 Hz que supere el valor crítico, mientras para las otras dos frecuencias hay muchos que cumplen esta condición. Esto no hace más que confirmar el hecho de que la fórmula utilizada no está bien ajustada para la transformada de *Hilbert*, ya que el resultado depende claramente de la velocidad de giro.

Como puede verse en las figuras 5-4 y 5-5 nos encontramos con el mismo resultado para todos los demás rodamientos.

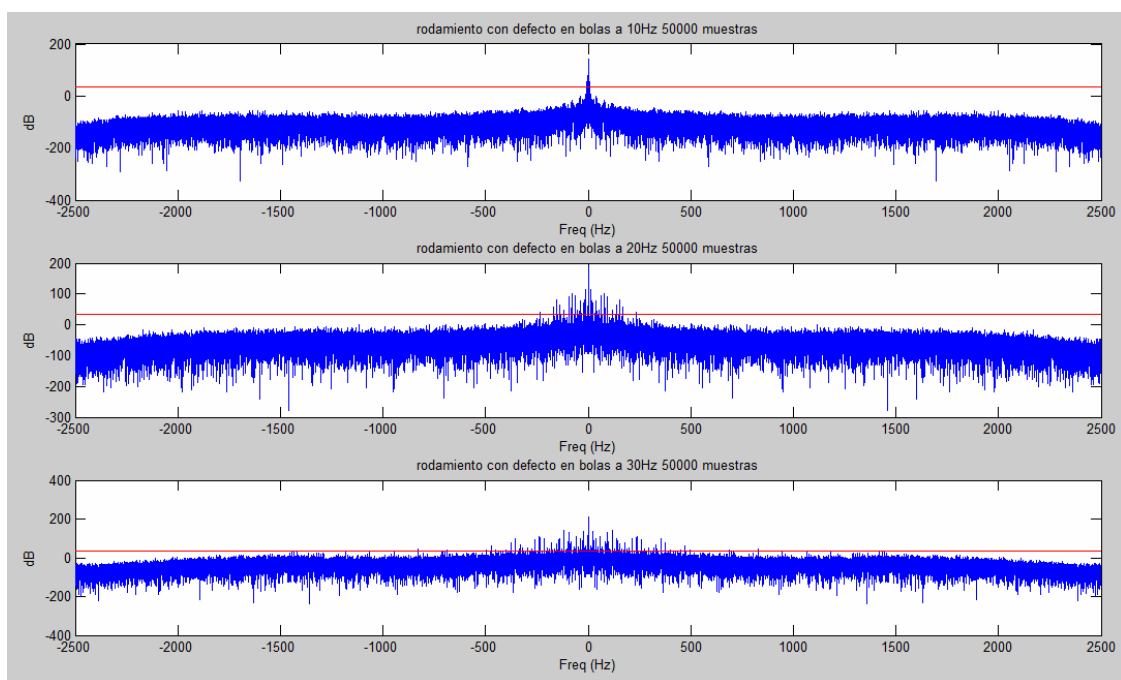


Figura 5-3 Hilbert-SPM, Rodamiento con defecto en bola

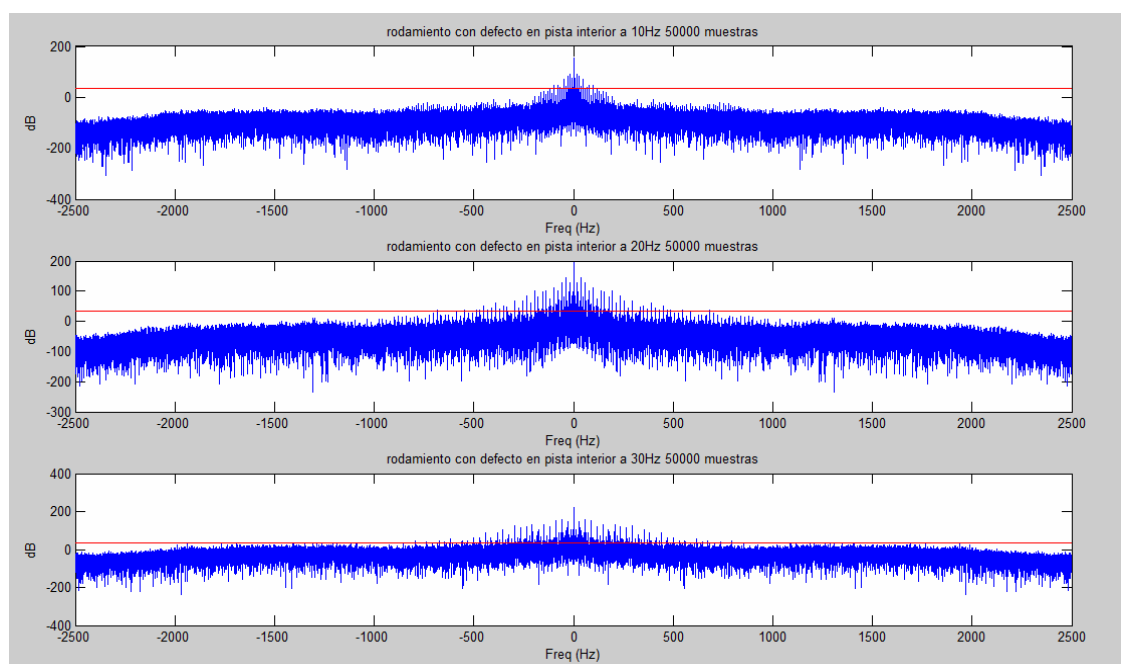


Figura 5-4 Hilbert-SPM, Rodamiento con defecto en la pista interna

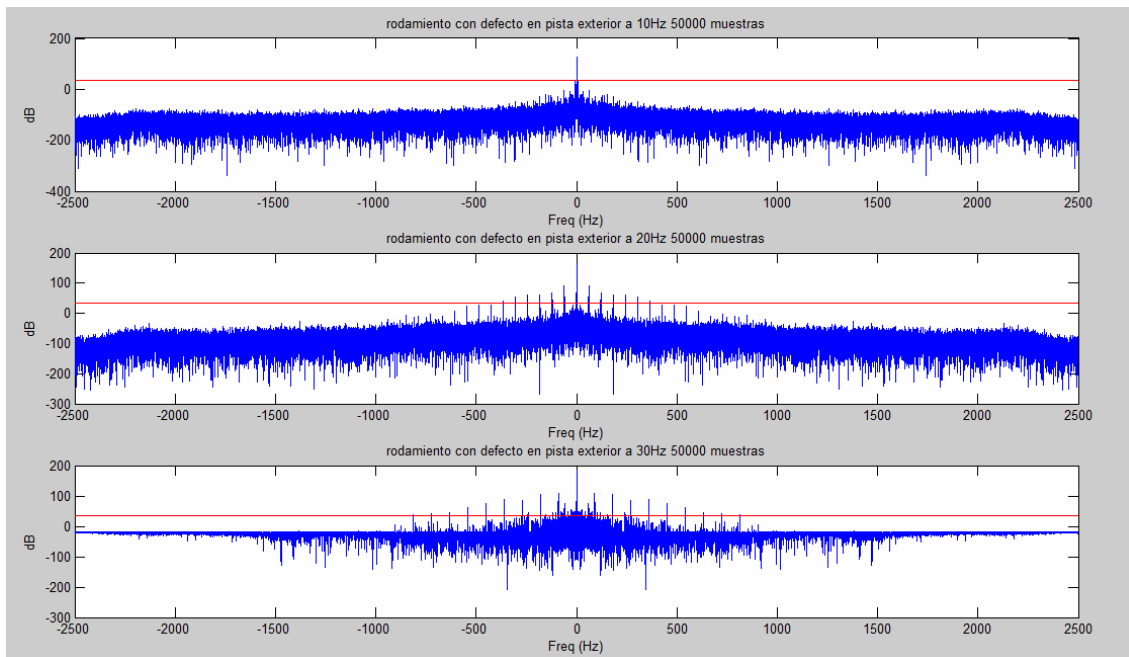


Figura 5-5 Hilbert-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa

Está claro que el rodamiento que mejores resultados nos ha dado para este método es el rodamiento con defecto en la pista externa, por lo tanto vamos a intentar ajustar correctamente los coeficientes de la ecuación para dicho rodamiento y posteriormente comprobaremos si ésta es válida para los demás rodamientos.

Ya que sólo disponemos de un tipo de rodamiento no podemos ajustar el exponente del diámetro en la ecuación 5.1, por lo tanto vamos a ajustar únicamente la constante “ a ” que multiplica dentro del logaritmo y el exponente “ b ” al que va elevada la velocidad de giro.

Para calcular los coeficientes se impondrá la condición de que para el valor del pico de frecuencia correspondiente con la frecuencia de defecto para la señal de 10 Hz y la de 30 Hz el valor normalizado sea 40dB (recordemos que por encima de 35 dB se considera que el rodamiento presenta algún tipo de defecto). Teóricamente para la frecuencia de 20 Hz el valor debe ser muy parecido, ya que se encuentra en medio de los otros dos puntos y no se ajustan demasiado mal a una recta (ver figura 5-6).

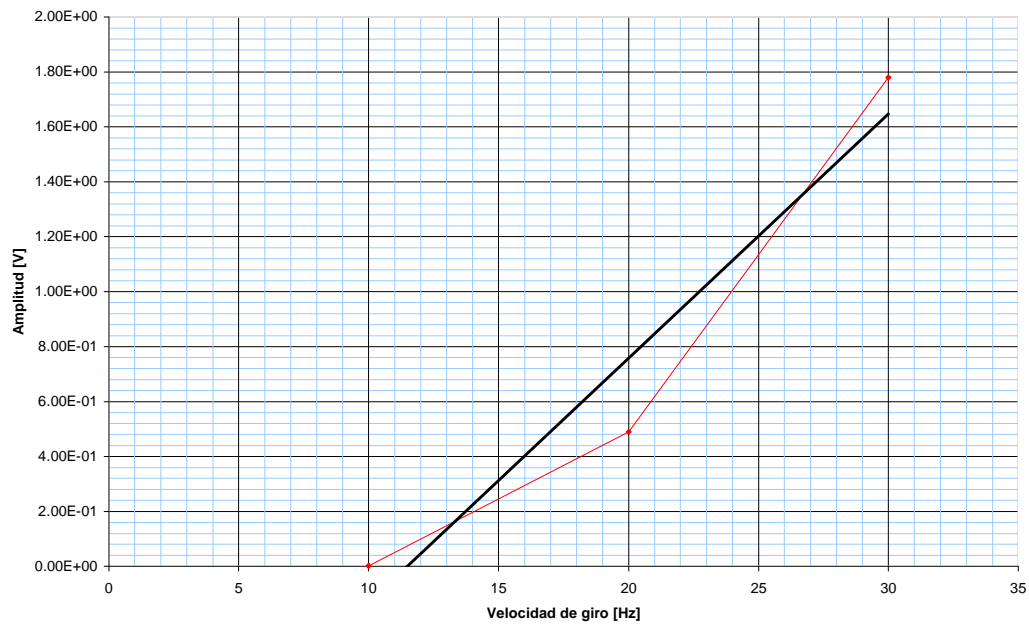


Figura 5-6 Amplitud vS Velocidad de giro

La ecuación que queremos ajustar va a ser de la forma:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot SV}{D \cdot v^b}\right) \quad (5.1)$$

Imponiendo las condiciones se obtiene con facilidad el exponente b

$$\left. \begin{aligned} 40 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.78}{D \cdot 30^b}\right) \\ 40 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.7 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{a \cdot 1.78}{D \cdot 30^b} = \frac{a \cdot 1.7 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b} \Rightarrow \left(\frac{3}{1}\right)^b = \frac{1.8}{0.48} \quad (5.2)$$

$$\Rightarrow \log(3)^b = \log\left(\frac{1.78}{1.7 \cdot 10^{-3}}\right) \Rightarrow b = \frac{\log\left(\frac{1.78}{1.7 \cdot 10^{-3}}\right)}{\log(3)} = 6.3296 \approx 6.33 \quad (5.3)$$

Sustituyendo en una de las dos ecuaciones del sistema podemos obtener a/D, no tiene ningún sentido conservar el diámetro en nuestras ecuaciones, ya que no disponemos de rodamientos con diferente diámetro para ajustar el exponente de éste.

$$\Rightarrow 40 = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.78}{D \cdot 30^{6.33}}\right) \Rightarrow \frac{a}{D} = \frac{e^2 \cdot 30^{6.33}}{1.78} = 9.3 \cdot 10^9 \quad (5.4)$$

De modo que la ecuación que vamos a utilizar queda de la siguiente forma:

$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{e^2 SV}{1.78} \cdot \left(\frac{30}{v} \right)^{6.33} \right) \quad (5.5)$$

Como ya se ha indicado no tiene ningún sentido que la ecuación 5.5 sea dependiente del diámetro, ya que no se dispone de datos para rodamientos con diferentes diámetros.

Tras las modificaciones introducidas, en ninguno de los casos hay valores superiores a 35 dB para el rodamiento sin defecto (ver figura 5-7), siendo los resultados independientes de la velocidad de giro utilizada.

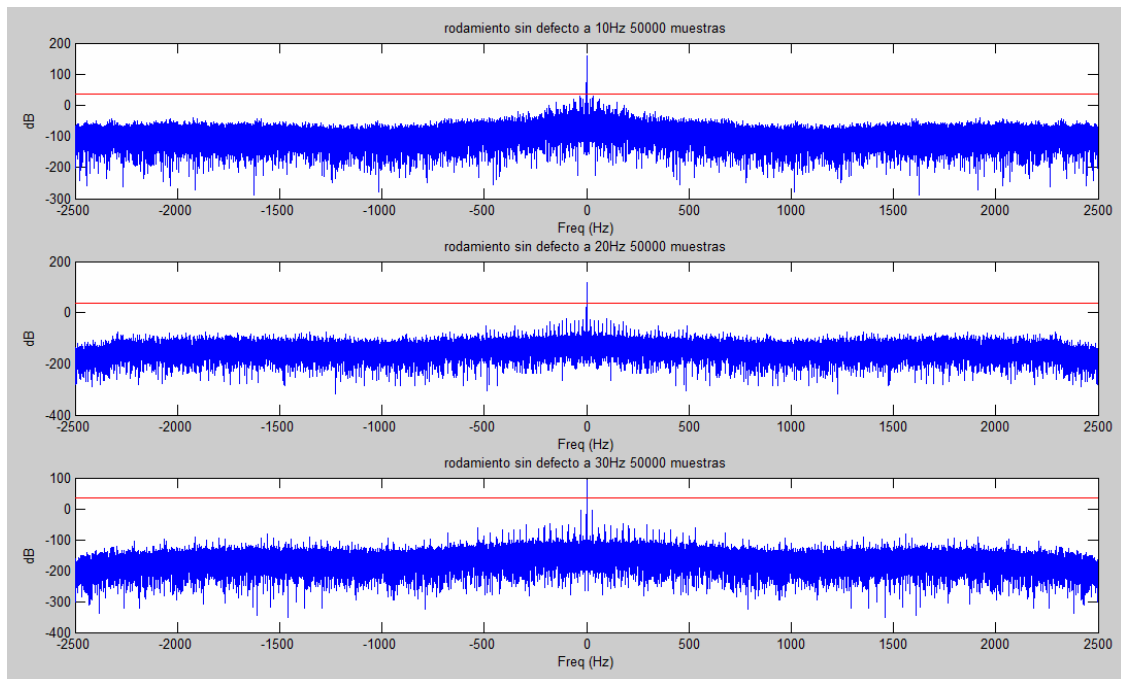


Figura 5-7 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento sin defecto

Para el rodamiento con defecto en bola, cuyos resultados se muestran en la figura 5-8, en todos los casos hay valores que superan los 35 dB, sin embargo no se puede asegurar que el resultado sea independiente de la velocidad de giro ya que hay menos frecuencias por encima del valor crítico cuando la frecuencia de giro es 10 Hz que para las otras dos frecuencias.

En la figura 5-9 se observa que los resultados para el rodamiento con defecto en la pista interna son, una vez más, positivos.

Evidentemente los resultados para rodamientos con defecto en la pista externa, mostrados en la figura 5-10, son perfectos; ya que es para este tipo de rodamiento para el que ajustamos la ecuación.

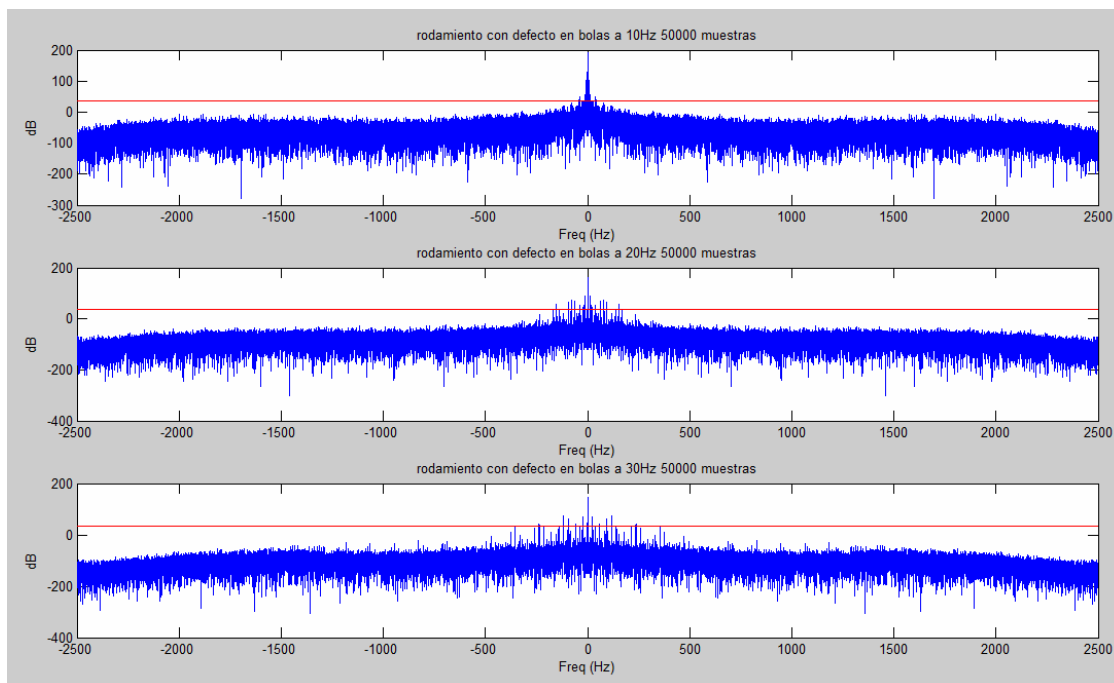


Figura 5-8 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento con defecto en bola

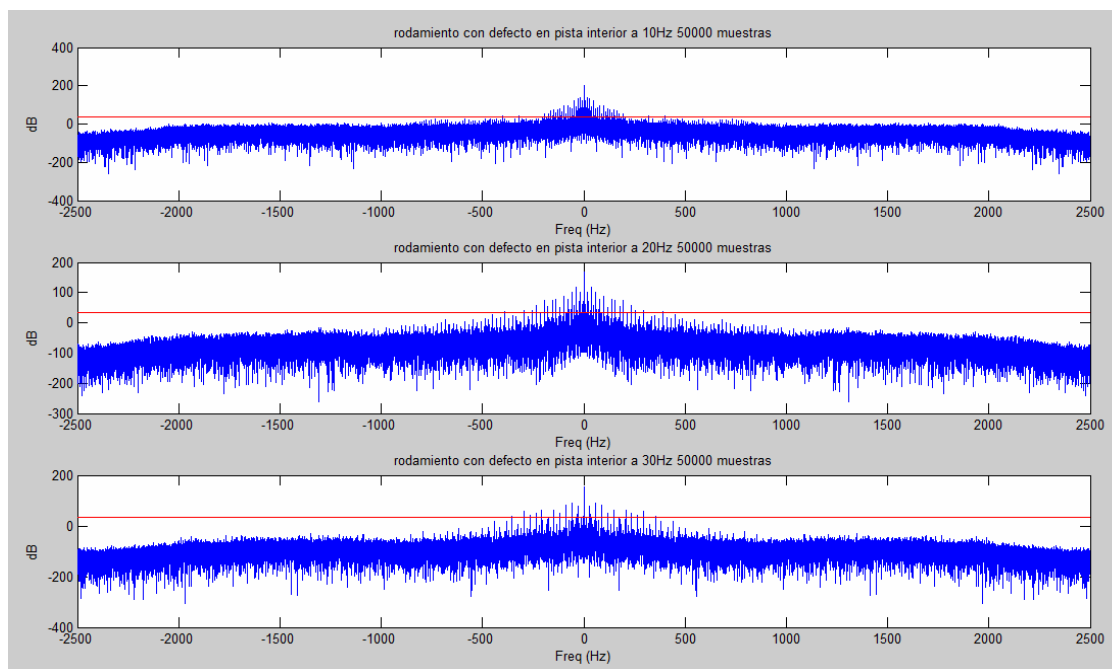


Figura 5-9 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento con defecto en la pista interna

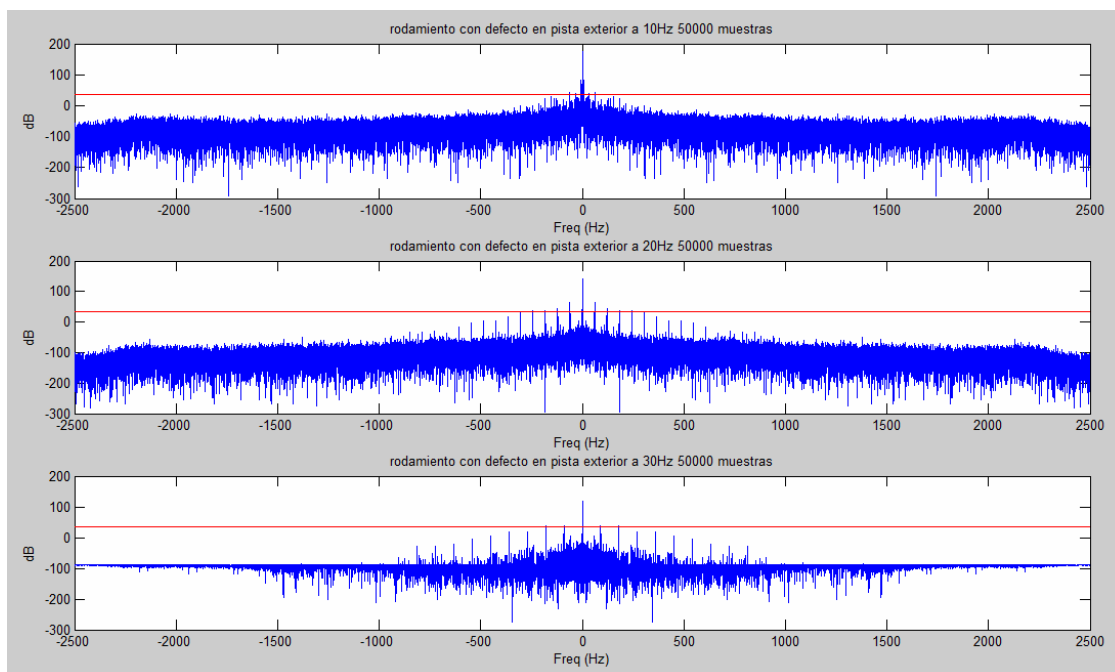


Figura 5-10 Hilbert-SPM mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa

Las mejoras introducidas han solucionado la dependencia de la velocidad de giro, por lo tanto el método es válido para identificar rodamientos con defecto. Las imágenes anteriores son para señales con 50000 muestras, posteriormente se extiende el método para todas las señales disponibles y se comprueba su validez. En principio no podemos decir que el método *shock pulse* sea válido para identificar el tipo de defecto. Se desarrolló un script para probar todos los rodamientos e identificar si presentan fallo o no. En las tablas 5-1 y 5-2 se muestran los resultados.

Los datos muestran que el número de muestras no parece tener demasiada influencia, aunque en el caso extremo de disponer únicamente de 5000 muestras se obtiene un porcentaje algo menor.

El bajo porcentaje para rodamiento con fallo en la pista exterior puede deberse a que los parámetros se han calculado ajustando demasiado, posteriormente se impuso que el valor normalizado fuera 60 dB en vez de 40 dB. Se esperaba que el porcentaje de acierto para rodamientos con defecto en la pista exterior fuera mucho mayor pero no mejoró en absoluto, por lo que se acepta la ecuación 5.5 como válida.

Tabla 5-1 Resultados aplicando el SPM mejorado

Número de muestras	5000	10000	15000	20000	25000	50000	Total
% acierto	80.00%	96.67%	95.00%	95.00%	100.00%	98.33%	94.17%

Tabla 5-2 Resultados aplicando el SPM mejorado

Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa	Total
% acierto	100.00%	90.00%	98.89%	87.78%	94.17%

5.2 TRANSFORMADA DE HILBERT-HUANG

Ya se ha visto que el método *shock pulse* puede aplicarse tras el espectro en frecuencia obtenido con la transformada de Hilbert, posteriormente se comprobó si los resultados eran igual de buenos con la transformada de *Hilbert-Huang* (HHT), en este caso se aplica la ecuación 5.1 a las 5 primeras funciones modales intrínsecas (IMF).

Se esperaba que los resultados siguieran sin ser satisfactorios para la ecuación 5.1, dada en [3], en este caso se realizó el análisis únicamente para rodamientos con defecto en la pista externa, como se puede ver, existe una fuerte dependencia de la velocidad de giro. Una vez más calculamos nuestros propios coeficientes para compensar correctamente las variaciones de la velocidad de giro.

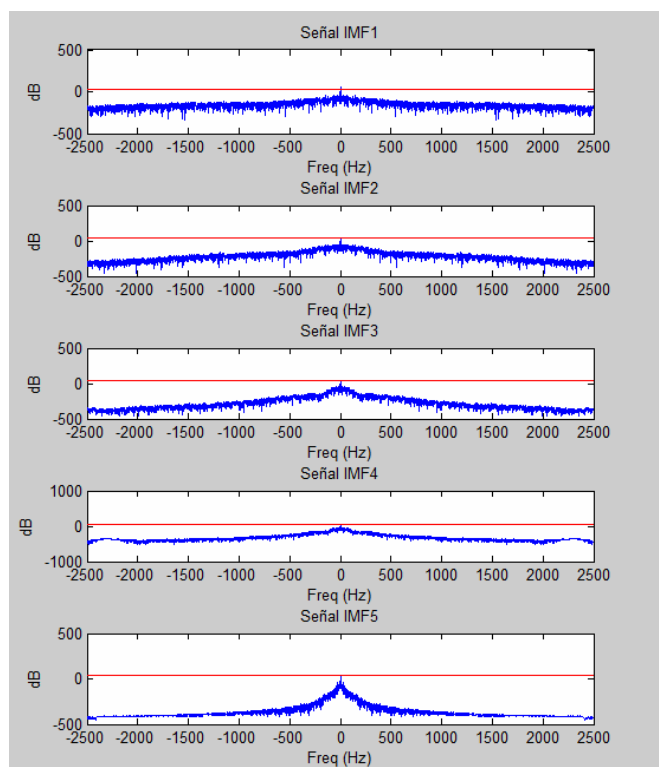


Figura 5-11 HHT-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz

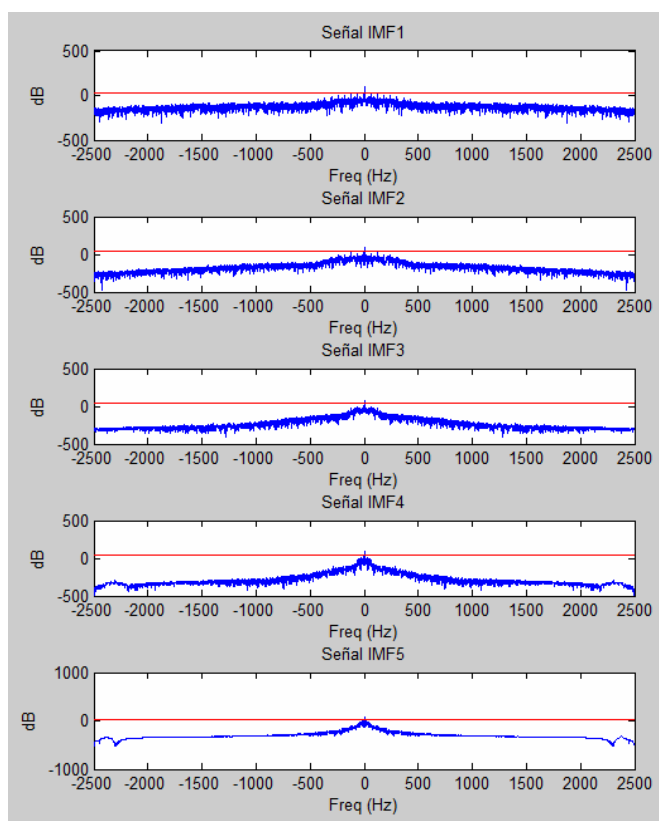


Figura 5-12 HHT-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz

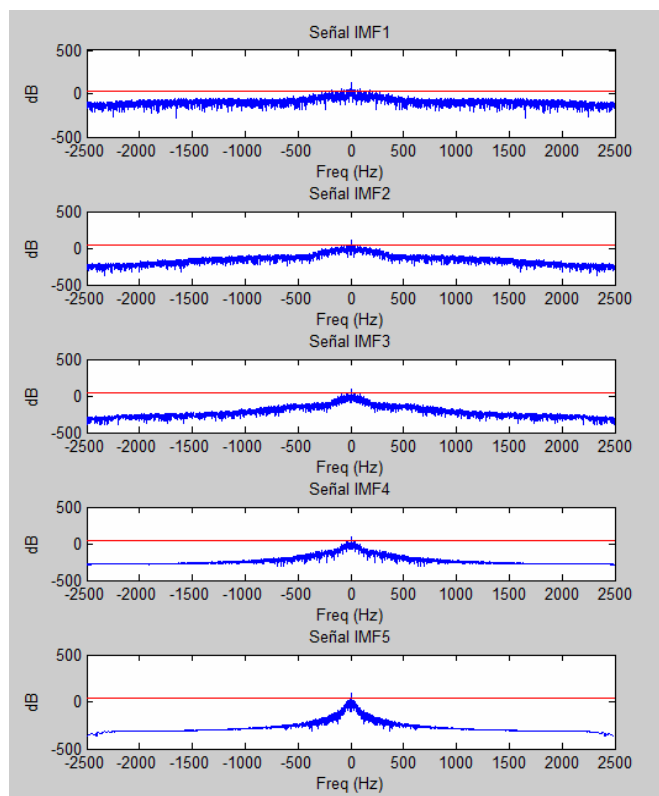


Figura 5-13 HHT-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz

Volvemos a plantear un sistema de ecuaciones similar al del apartado anterior, a partir de la ecuación 5.1.

$$\left. \begin{aligned} 40 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.81}{D \cdot 30^b}\right) \\ 40 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{a \cdot 0.81}{D \cdot 30^b} = \frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b} \Rightarrow \left(\frac{3}{1}\right)^b = \frac{0.81}{1.3 \cdot 10^{-3}} \quad (5.6)$$

$$\Rightarrow \log(3)^b = \log\left(\frac{0.81}{1.3 \cdot 10^{-3}}\right) \Rightarrow b = \frac{\log\left(\frac{0.81}{1.3 \cdot 10^{-3}}\right)}{\log(3)} = 5.8571 \quad (5.7)$$

$$\Rightarrow 40 = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.81}{D \cdot 30^{5.8571}}\right) \Rightarrow \frac{a}{D} = \frac{e^2 \cdot 30^{5.8571}}{0.81} \quad (5.8)$$

De modo que la ecuación que vamos a utilizar queda de la siguiente forma:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{e^2 SV}{0.81} \cdot \left(\frac{30}{v}\right)^{5.8571}\right) \quad (5.9)$$

Lo primero que cabe destacar es que los resultados, mostrados en las tablas 5-3 y 5-4, son mucho peores al disminuir el número de muestras. El porcentaje tan bajo obtenido se debe principalmente a un bajísimo porcentaje de acierto en rodamientos con fallo en la pista externa. En este caso fue completamente necesario recalcular los coeficientes ajustando con más holgura el valor normalizado.

Tabla 5-3 Resultados aplicando el SPM mejorado

HHT						
Número de muestras	5000	10000	15000	20000	25000	50000
% acierto	65.00%	85.00%	86.67%	91.67%	88.33%	95.00%
Total	85.28%					

Tabla 5-4 Resultados aplicando el SPM mejorado

HHT				
Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa
% acierto	98.89%	91.11%	96.67%	54.44%
Total	85.28%			

El sistema de ecuaciones va a quedar de la siguiente manera.

$$\left. \begin{aligned} 60 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.81}{D \cdot 30^b}\right) \\ 60 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow dB = 20 \cdot \log\left(\frac{e^3 SV}{0.81} \cdot \left(\frac{30}{v}\right)^{5.8571}\right) \quad (5.10)$$

Tras ajustar de nuevo la ecuación se ha mejorado mucho el resultado para rodamientos con fallo en la pista externa (tablas 5-5 y 5-6), acercándonos al porcentaje de acierto obtenido para la transformada de Hilbert.

Tabla 5-5 Resultados aplicando el SPM mejorado

HHT							
Número de muestras	5000	10000	15000	20000	25000	50000	Total
% acierto	88.33%	100.00%	96.67%	91.67%	98.33%	91.67%	94.44%

Tabla 5-6 Resultados aplicando el SPM mejorado

HHT					
Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa	Total
% acierto	86.67%	100.00%	100.00%	91.11%	94.44%

5.3 ESQUEMA DE LIFTING REDUNDANTE

Para finalizar se aplicó el mismo método para los espectros en frecuencia obtenidos tras el Esquema de *Lifting* Redundante (RLS), se calculó el valor normalizado para todas las frecuencias para cada uno de los tres primeros niveles de descomposición.

El resultado para el Esquema de *Lifting* Redundante volvió a ser no satisfactorio. Como se puede ver en las figuras 5-14 a 5-16 existe una fuerte dependencia del valor normalizado con la velocidad de giro.

Una vez más, siguiendo la misma metodología que en los dos puntos anteriores, se ha obtenido nuevos coeficientes que eliminan dicha dependencia.

En este caso solamente se ha estudiado el rodamiento con defecto en la pista exterior, pero es suficiente para comprobar que no tenemos estabilidad frente a variaciones en la velocidad de giro.

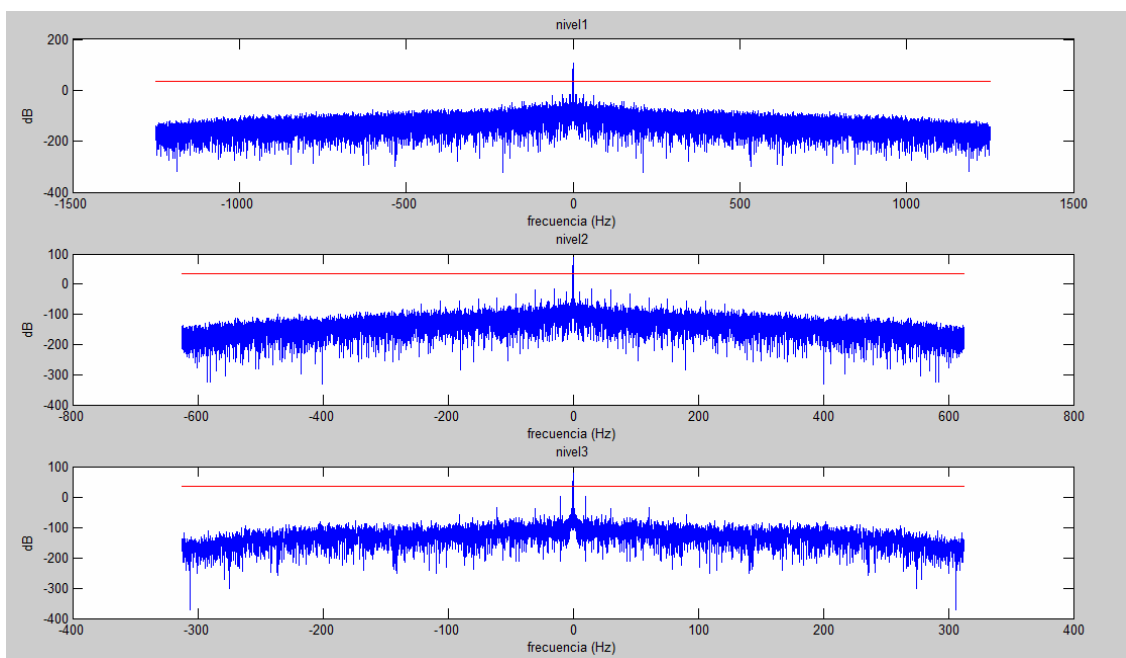


Figura 5-14 RLS-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz

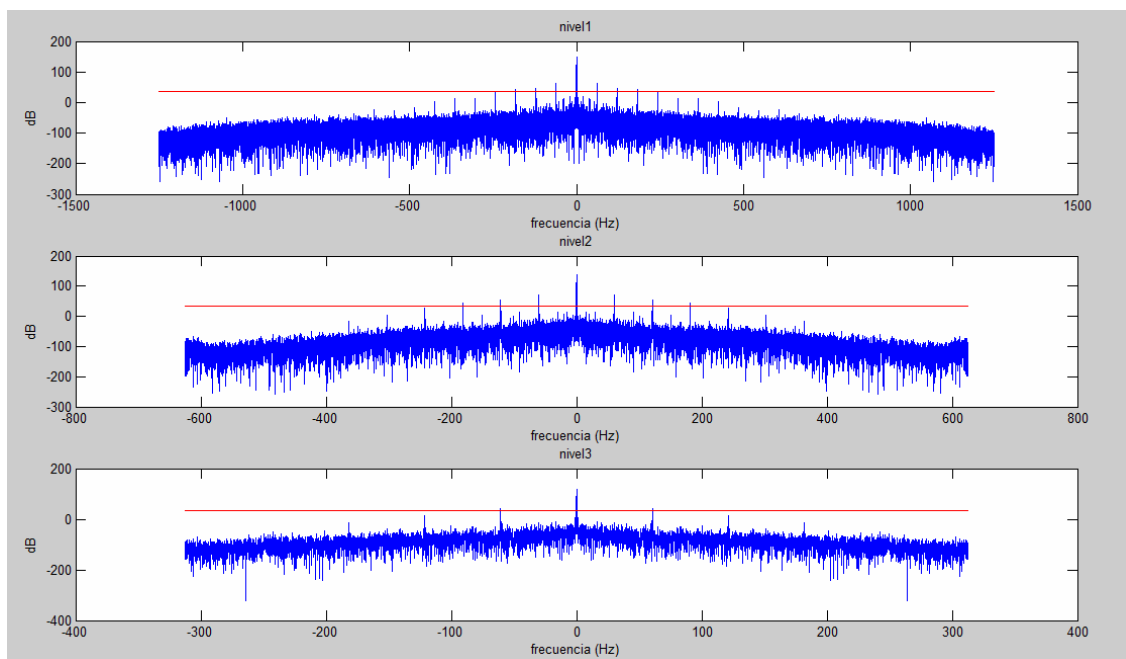


Figura 5-15 RLS-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz

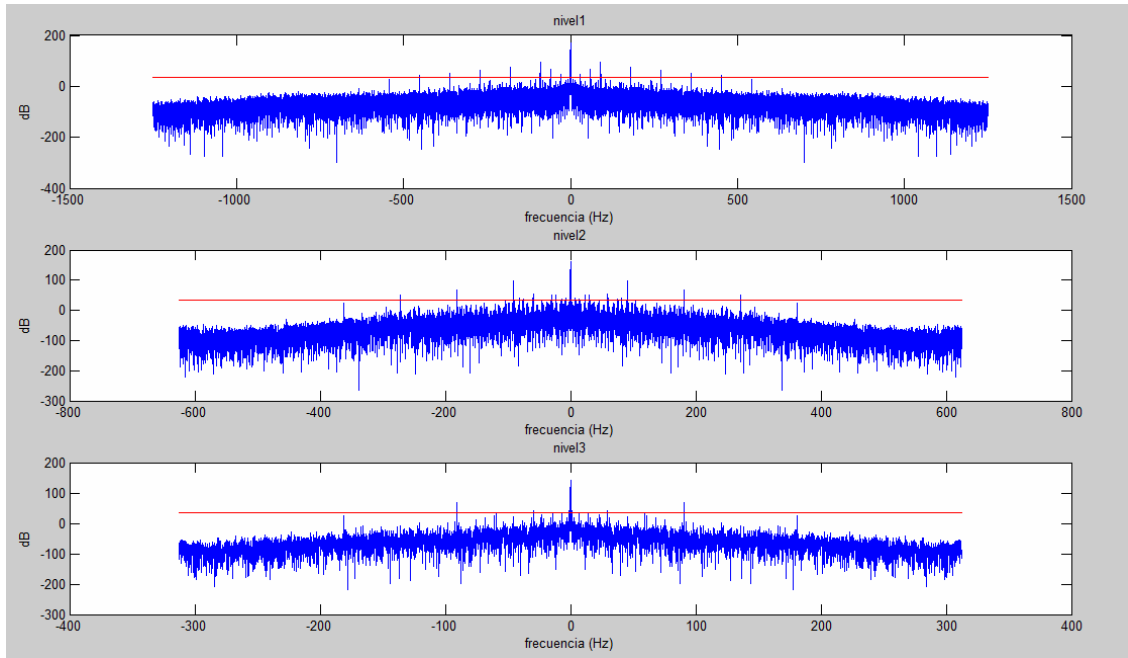


Figura 5-16 RLS-SPM, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz

Se vuelve a proceder de la misma manera.

$$\left. \begin{aligned} 40 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.97}{D \cdot 30^b}\right) \\ 40 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b}\right) \end{aligned} \right\} \Rightarrow \frac{a \cdot 0.97}{D \cdot 30^b} = \frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b} \Rightarrow \left(\frac{3}{1}\right)^b = \frac{0.97}{1.3 \cdot 10^{-3}} \quad (5.11)$$

$$\Rightarrow \log(3)^b = \log\left(\frac{0.97}{1.3 \cdot 10^{-3}}\right) \Rightarrow b = \frac{\log\left(\frac{0.97}{1.3 \cdot 10^{-3}}\right)}{\log(3)} = 6.0212 \approx 6.02 \quad (5.12)$$

$$\Rightarrow 40 = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.97}{D \cdot 30^{6.0212}}\right) \Rightarrow \frac{a}{D} = \frac{e^2 \cdot 30^{6.0212}}{0.97} = 5.9 \cdot 10^9 \quad (5.13)$$

De modo que la ecuación que vamos a utilizar queda de la siguiente forma:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{e^2 SV}{0.97} \cdot \left(\frac{30}{v}\right)^{6.0212}\right) \quad (5.14)$$

Los resultados aplicando dicha ecuación son mucho más estables frente a variaciones en la velocidad de giro, en la mayoría de los casos los valores más elevados se encuentran en el primer nivel de descomposición.

Los resultados para el rodamiento con defecto en la pista externa se muestran en las figuras 5-17 a 5-19.

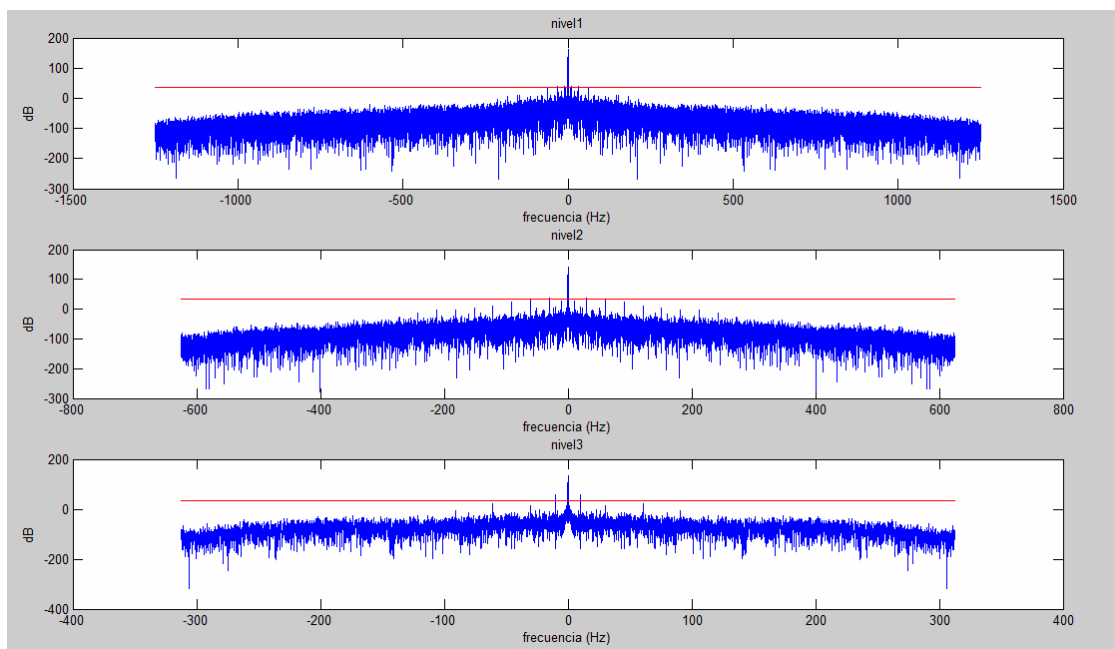


Figura 5-17 RLS-SPM Mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 10 Hz

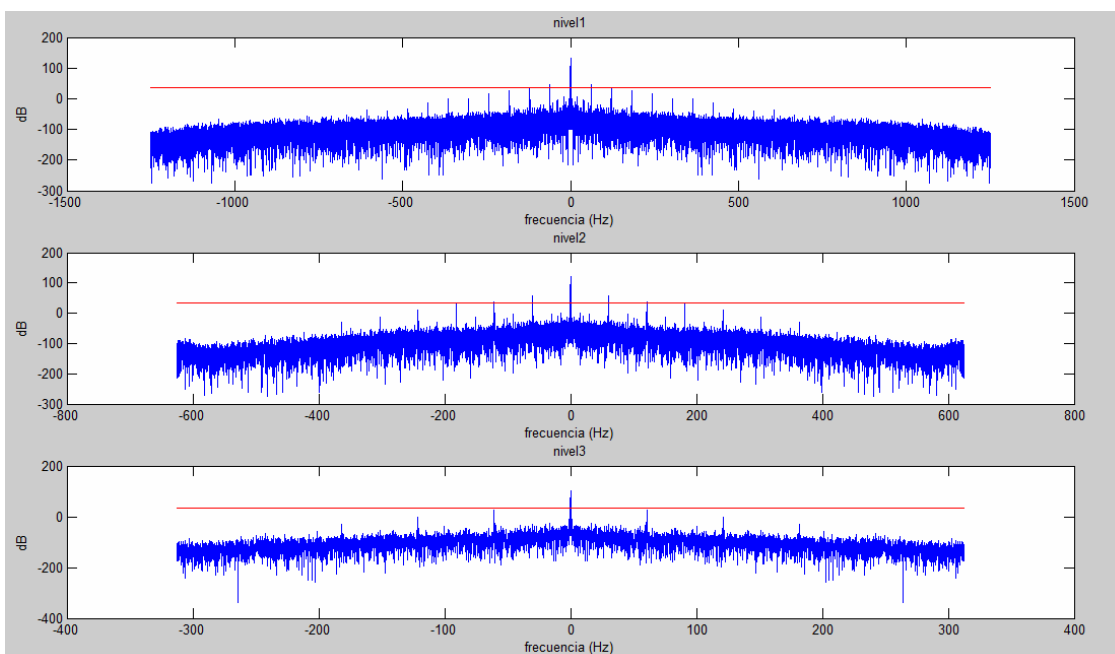


Figura 5-18 RLS-SPM Mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 20 Hz

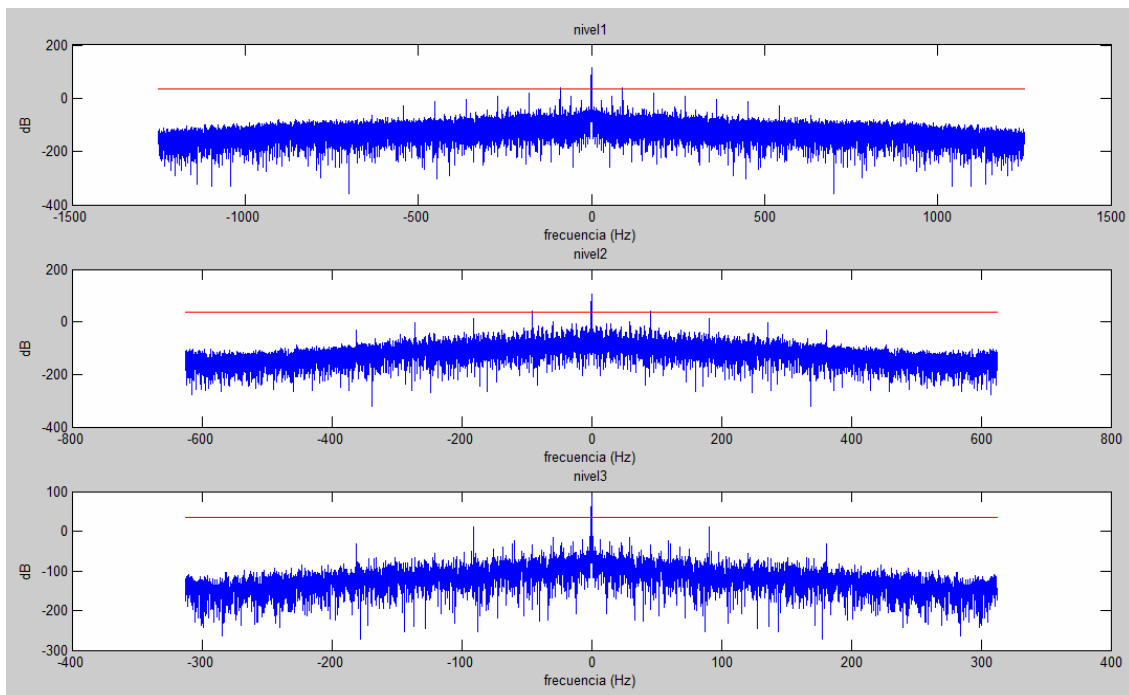


Figura 5-19 RLS-SPM Mejorado, Rodamiento con defecto en la pista externa girando a 30 Hz

Se presentan los resultados en las tablas 5-7 y 5-8. En este caso el porcentaje total de aciertos es bastante menor al de los casos anteriores. Esto se debe fundamentalmente a que la ecuación ha sido ajustada con muy poco margen y en la mayor parte de los casos los rodamientos con defecto en la pista externa no son detectados como tal.

Puede verse que existe cierta sensibilidad de los resultados a las variaciones en el número de muestras.

Tabla 5-7 Resultados aplicando el SPM mejorado

Número de muestras	5000	10000	15000	20000	25000	50000	Total
% acierto	56.67%	68.33%	75.00%	73.33%	83.33%	85.00%	73.61%

Tabla 5-8 Resultados aplicando el SPM mejorado

Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa	Total
% acierto	94.44%	87.78%	93.33%	18.89%	73.61%

Se vuelven a calcular los coeficientes de la ecuación imponiendo que el valor normalizado no sea 40, sino 50 dB

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot SV}{D \cdot v^b}\right) \quad (5.15)$$

$$\left. \begin{aligned} 50 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.97}{D \cdot 30^b}\right) \\ 50 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.16)$$

De modo que la ecuación que vamos a utilizar queda de la siguiente forma:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{e^{2.5} SV}{0.97} \cdot \left(\frac{30}{v}\right)^{6.0212}\right) \quad (5.17)$$

Como puede verse en las tablas 5-9 y 5-10 el resultado mejora sustancialmente, pero sigue sin ser aceptable, por lo tanto aumentaremos la holgura hasta los 25 dB.

Tabla 5-9 Resultados aplicando el SPM mejorado

Número de muestras	5000	10000	15000	20000	25000	50000	Total
% acierto	68.33%	75.00%	83.33%	81.67%	90.00%	90.00%	81.39%

Tabla 5-10 Resultados aplicando el SPM mejorado

Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa	Total
% acierto	91.11%	95.56%	97.78%	41.11%	81.39%

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot SV}{D \cdot v^b}\right) \quad (5.18)$$

$$\left. \begin{aligned} 60 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 0.97}{D \cdot 30^b}\right) \\ 60 &= 20 \cdot \log\left(\frac{a \cdot 1.3 \cdot 10^{-3}}{D \cdot 10^b}\right) \end{aligned} \right\} \quad (5.19)$$

De modo que la ecuación que vamos a utilizar queda de la siguiente forma:

$$dB = 20 \cdot \log \left(\frac{e^3 SV}{0.97} \cdot \left(\frac{30}{v} \right)^{6.0212} \right) \quad (5.20)$$

Los nuevos resultados obtenidos demuestran que sigue existiendo una fuerte dependencia del número de muestras, esto nos hace pensar que la calidad del método no lo es tal, ya que dicha dependencia no debería existir. Así mismo, con este cambio en los coeficientes hemos mejorado la detección de defectos en la pista externa a costa de empeorar los resultados para rodamientos sin fallo.

El porcentaje total de acierto no llega a los niveles obtenidos con métodos anteriores.

Tabla 5-11 Resultados aplicando el SPM mejorado

CS							
Número de muestras	5000	10000	15000	20000	25000	50000	Total
% acierto	90,00%	91,67%	91,67%	88,33%	90,00%	85,00%	89,44%

Tabla 5-12 Resultados aplicando el SPM mejorado

CS					
Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en las bolas	Fallo en la pista interior	Fallo en la pista exterior	Total
% acierto	80,00%	100,00%	98,89%	78,89%	89,44%

5.4 CLASIFICACIÓN DEL DEFECTO

Ya hemos visto que se puede determinar con cierta precisión la existencia o no de defectos en rodamientos mediante este método. En este último apartado queremos comprobar si el método permite determinar, no sólo la existencia de defecto, sino el tipo de defecto.

El diagrama de flujo de la figura 5-20 resume el algoritmo utilizado.

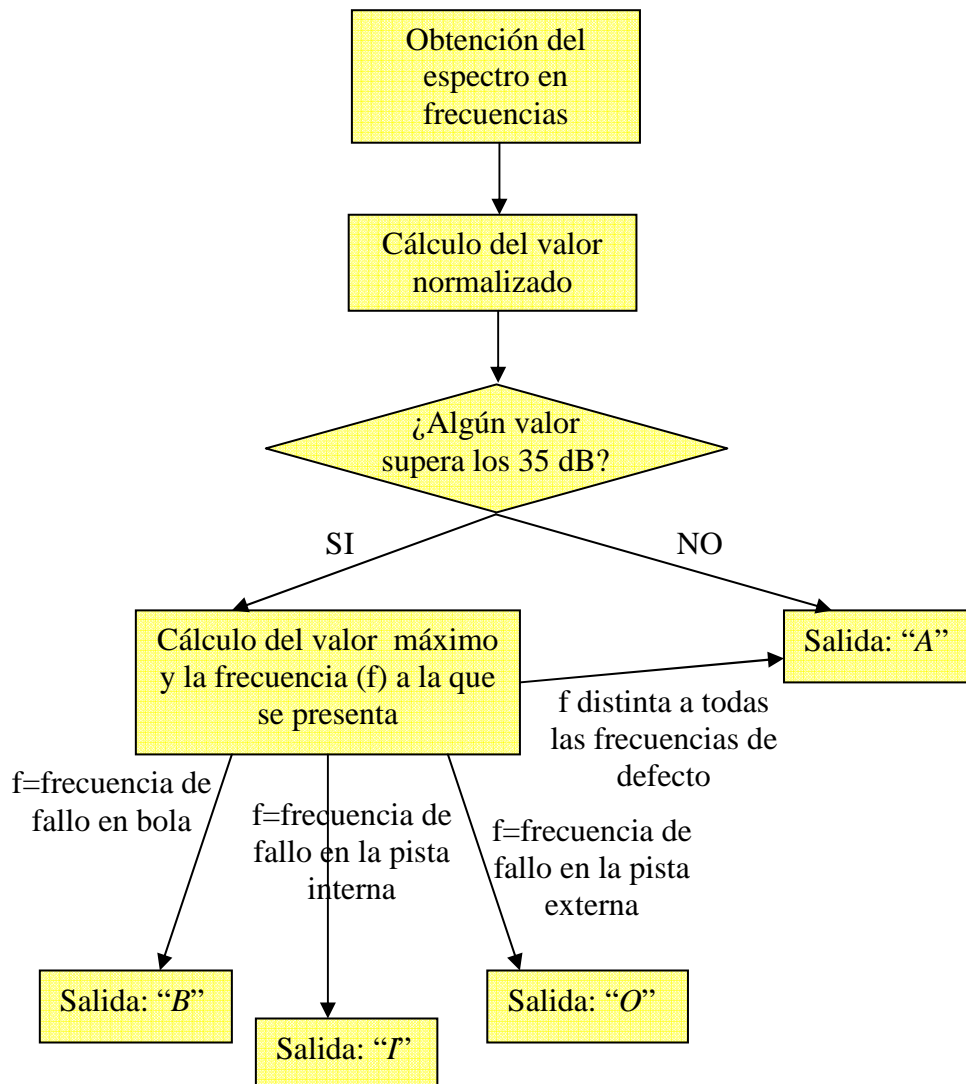


Figura 5-20 Diagrama de flujo para el método Shock pulse

Evidentemente el resultado es mucho peor. Para la transformada de Hilbert el método es capaz de determinar en algunos casos que el rodamiento con defecto en la pista externa lo presenta. En la mayor parte de los casos el rodamiento con defecto en la pista interna es caracterizado como rodamiento con defecto en bola, ya se indicó anteriormente que existía cierta sospecha de que dicho rodamiento presentase también un defecto en bola y esto no hace más que confirmarlo.

En el rodamiento con defecto en bola no somos capaces de distinguir el tipo de defecto, esto se debe al hecho de que aparezca un pico de frecuencia por debajo de la velocidad de giro.

Evidentemente en los rodamientos sin fallo no se encuentra amplificada ninguna de las frecuencias características.

Tabla 5-13 clasificación del defecto: transformada de Hilbert

HT					
Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa	Total
% acierto	100.00%	0.00%	0.00%	60.00%	40.00%

Con la transformada de Hilbert-Huang los resultados para rodamiento sin fallo son un poco peores, mejora la detección de defectos para rodamientos con defecto en la pista externa.

Tabla 5-14 clasificación del defecto: transformada de Hilbert-Huang

HHT					
Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista extena	Total
% acierto	86.67%	0.00%	0.00%	68.89%	38.89%

Para el caso del cycle spinning los resultados son un poco mejores, esto se debe a un mayor porcentaje de acierto en los dos tipos de rodamiento. Si no tenemos en cuenta los rodamientos con defecto en la pista interna y en bola podría decirse que tenemos un porcentaje de acierto superior al 80%.

Tabla 5-15 clasificación del defecto: cycle spinning

CS					
Tipo de rodamiento	Sin fallo	Fallo en bola	Fallo en la pista interna	Fallo en la pista externa	Total
% acierto	100.00%	0.00%	0.00%	78.89%	44.72%

6. CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

6.1 CONCLUSIONES

El objetivo de este proyecto era realizar un estudio de señales de vibración obtenidas de una máquina en la que se montaron rodamientos con diferentes tipos de defecto. Tras la obtención de los espectros en frecuencia de las señales por diferentes métodos, se pasó a aplicar el método *shock pulse*, para tratar de identificar automáticamente si el rodamiento presentaba algún defecto y donde estaba localizado.

Este método es muy utilizado en la industria para determinar cuando un rodamiento presenta algún tipo de defecto, pero no es tan común el combinarlo con técnicas espectrales para identificar la localización del defecto.

A continuación se analizan los resultados obtenidos:

- Al aumentar la velocidad de giro del eje aumenta la amplitud de las vibraciones obtenidas, así como el ruido presente en la señal, por lo tanto es posible distinguir a simple vista y con sólo la representación temporal un rodamiento en perfecto estado de uno que no lo está.
- La transformada de Fourier no aporta información útil de las señales, ya que hay mucho ruido y las frecuencias de defecto y de giro del eje quedan ocultas por éste en el espectro de frecuencias.
- La transformada de Hilbert es un buen método de filtrado, aplicando posteriormente la transformada de Fourier obtenemos los resultados esperados.
- Si aplicamos técnicas de descomposición, como la descomposición modal empírica o el *cycle spinning*, antes de aplicar la transformada de Hilbert, el espectro de frecuencias obtenido es mucho más limpio.
- El rodamiento cuyo defecto se distingue mejor es el rodamiento con defecto en la pista externa, en el rodamiento con defecto en bola nos encontramos con una frecuencia cuyo origen desconocemos. En el rodamiento con defecto en la pista interna todo apunta a que exista también algún tipo de fallo en bola.



-METODO SHOCK PULSE PARA DETECCIÓN DE DEFECTOS EN RODAMIENTOS-

- La aplicación del método *shock pulse* tal cual se explicaba en el artículo del que surge la idea del proyecto [3] no es válida porque no compensa correctamente la velocidad de giro. Se han obtenido nuevas relaciones para salvar este contratiempo.
- En principio el método *shock pulse* no se aplicaba después de ningún tipo de descomposición, se trataba tan sólo de una medida analógica sobre la misma señal. Aun así hemos visto que su aplicación combinada con técnicas espectrales arroja unos resultados muy buenos a la hora de determinar si un rodamiento posee o no un defecto. Llegamos a porcentajes de acierto cercanos al 95%.
- El método utilizado, en el que se combinaban técnicas espectrales con el método *shock pulse*, no ha permitido determinar con los mismos niveles de fiabilidad donde se encuentra el defecto. Mediante un análisis profundo de las señales hemos visto que podemos determinarlo sin problema, pero a la hora de tratar de automatizar el análisis no hemos obtenido porcentajes muy altos de acierto. Este hecho no debe preocuparnos en absoluto, ya que una vez un rodamiento posee un defecto debe programarse su sustitución, independientemente de la localización del defecto.

6.1 FUTUROS DESARROLLOS

Los algoritmos programados en este proyecto convergen relativamente bien, pero no lo suficientemente rápido como para poder automatizar un proceso de detección de defectos en tiempo real.

Con objeto de llevar a cabo dicha tarea, se propone programar los mismos algoritmos en código C, bien para utilizarlos directamente sobre un microprocesador o bien para utilizarlos en scripts en matlab® como archivos .mex.

Se obtuvieron fórmulas para el valor normalizado del método *shock pulse* que compensen correctamente la velocidad de giro, pero no se disponía de datos obtenidos con diferentes tipos de rodamiento, por lo tanto no se conoce la influencia real del diámetro del rodamiento sobre el valor normalizado. Se propone la obtención de relaciones también dependientes del diámetro.

Dado que el porcentaje de acierto a la hora de determinar la localización del defecto no es demasiado alto, sería interesante trabajar más sobre el tema, para desarrollar un algoritmo que nos permita acercarnos al porcentaje de acierto que obtuvimos a la hora de determinar si un rodamiento presentaba defecto o no.

Se propone el desarrollo de una aplicación en matlab® con un entorno gráfico, para que, a partir de los programas desarrollados en este proyecto, una persona sin conocimientos sobre el tema pueda determinar si un rodamiento presenta defecto y donde lo hace.



7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] I.Martínez, “*Toma de señales de vibración en rodamientos*”. Trabajo dirigido, Universidad Carlos III de Madrid, Junio 2008.
- [2] E.Estupiñan, P Saavedra: “*Diagnostic techniques for the vibration analysis of bearings*”. Documento interno, Universidad de Tarapacá y Universidad de la Concepción, Chile.
- [3] L.Zhen, H.Zhengjia, Z.Yanyang, C.Xuefeng: “*Bearing condition monitoring based on shock pulse method and improved redundant lifting scheme*”. Artículo, Mathematics and Computers in simulation 79 (2008) p. 318–338.
- [4] V.K. Rai, A.R.Mohanty, “*Bearing fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert-Huang transform*”. Artículo, Mechanical Systems and Signal Processing 21 (2007) p. 2607–2615.
- [5] M.K.Marcum, “*Redundant Wavelet-Based Image restoration using a priori information*”. Tesis Doctoral, Air force institute of technology (2001).
- [6] Norden E.Huang. “*Introduction to the Hilbert-Huang transform and its related mathematical problems*”. Documento interno, Goddard Institute for Data Analysis, Code 614.2, NASA
- [7] Uyterhoeven.G, Roose.D, Bultheel.A. “*Integer wavelet Transform using the Lifting Scheme*”. Documento interno, Katholieke Universiteit Leuven. (1999)
- [8] H.Jiang, Z.Wang, “*Fault Feature Extraction Using Redundant Lifting Scheme and Independent Component analysis*”. Conferencia, International conference in mechatronics and Automation, August 5 - 8, 2007, Harbin, China.
- [9] G.Lee, “*What is shock pulse method*”. Documento interno disponible en Internet, <http://www.reliabilityweb.com>. Última visita: 15 de Junio de 2009



[10] Time invariant-Signals and systems Figura 2-11 disponible en Internet, <http://timeinvariant.com>. Última visita : 15 de Junio de 2009

[11] Polikar.R. The Wavelet tutorial. Rowan University. College of Engineering. 1999. Tutorial Disponible en Internet, <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS/WTtutorial.html>. Última visita: 15 de Junio de 2009

[12] Ian Kaplan. Wavelets and Signal processing. Tutorial disponible en internet, http://www.bearcave.com/misl/misl_tech/wavelets/ (2001-2003). Última visita: 15 de Junio de 2009



8. ANEXOS

En esta sección se incluye una guía rápida de utilización de las funciones y scripts desarrollados.

8.1 ESPECTRO_FREQ

```
function [B,t,freq]=espectro_freq(A,Fs)
```

Este programa calcula la transformada de Fourier de una señal así como los vectores tiempo y frecuencia para su posterior representación. Las entradas son el vector cuya transformada quiere calcularse y la frecuencia de muestreo, que en todos los casos ha sido 5000 muestras por segundo.

La representación que se llevará a cabo es del espectro de frecuencias completo, y no sólo de la parte positiva de éste.

8.2 TEST_FFT

Se trata de un script en el que se hace un plot de la representación temporal y en frecuencias de una señal por cada frecuencia y tipo de rodamiento. Se utiliza la función `max` para señalar los 5 picos máximos del espectro.

8.3 MAXIMOS

La siguiente función devuelve ordenados de mayor a menor los cinco máximos de un vector tras haber aplicado la transformada de Fourier así como las frecuencias correspondientes con dichos máximos. Por lo tanto las entradas serán las salidas *B* y *freq* de la función *espectro_freq*.

La salida *x* son los máximos y la *y* son las frecuencias que se corresponden con cada máximo.

```
function [x,y]=maximos(B,freq)
```

8.4 HT

La siguiente función calcula, haciendo uso de la transformada de Hilbert, el espectro en frecuencia y los vectores tiempo y frecuencia para una señal de entrada de la que se dispone de información acerca de su frecuencia de muestreo.

El algoritmo es muy parecido al del programa *espectro_freq*, con la diferencia de que en este caso se calcula la transformada de Hilbert y su envolvente, para sobre ésta aplicar la transformada de Fourier.

```
function [B,t,freq]=ht(A,Fs)
```

8.5 TEST_HT

Se trata del mismo test que aplicamos sobre el programa *espectro_freq*, pero en este caso aplicado sobre la función HT.

8.6 EMD

Esta función necesita como entradas la señal y la frecuencia de muestreo. La salida es una matriz, en la que las columnas son las funciones modales intrínsecas (imf), después de aplicar la descomposición modal empírica.

```
function imf = emd(x,Fs)
```

8.7 HHT

Esta función necesita como entrada la matriz de salida del programa emd. Se aplica la transformada de Hilbert a cada una de las IMF y se realiza la representación temporal de las IMF así como su espectro en frecuencias después de la transformada de Hilbert como técnica de filtrado. Las salidas son, no sólo las representaciones, sino también una matriz con todos los vectores obtenidos tras la transformada de Hilbert y el vector correspondiente al eje de frecuencias.

```
function [B,freq]=hht(A,Fs)
```

8.8 TEST_HHT

Se trata de un script igual que los de los casos anteriores. En este caso se realiza para todas las señales la descomposición modal empírica y posteriormente se aplica la función *hht*.

8.9 CYCLE_SPINNING

Esta función realiza la descomposición en 3 niveles utilizando el algoritmo “*Cycle spinning*” que se trata de una variante del “*Lifting scheme*” con estabilidad temporal.

La entrada es la señal de vibración a tratar y las salidas son unas matrices tridimensionales *c* y *d* en las que se almacenan los vectores de actualización y predicción, correspondientes a cada nivel de descomposición, así como un vector *N* en el que se almacena la longitud de los vectores (número de datos) correspondientes con cada nivel de descomposición.

```
function [c,d,N]=cycle_spinning(x)
```

8.10 MEAN_CS

Se realiza la media de todas las señales de actualización obtenidas en el *cycle_spinning* y se representan los espectros de frecuencias de cada una de dichas señales ayudándonos de la función *HT*.

```
function a=mean_cs(x)
```

8.11 MEAN_CS_TEST

Se vuelve a aplicar el programa a una serie de señales. En este caso se aplica a 6 señales correspondientes a rodamientos sin defecto y a otras 3 por cada uno de los demás tipos de rodamiento.

8.12 SPM_HILBERT

Empezamos con una serie de funciones y scripts orientados a la segunda parte del proyecto, en la que se combina cada uno de los métodos con el método *shock pulse*. Este script es realmente muy parecido al script *ht_test*, pero calcula el valor normalizado y lo representa con una línea de referencia en 35 dB.

8.13 SPM_HILBERT_TEST

Este script realiza el test para todas las señales disponibles para el SPM combinado con la transformada de Hilbert. La salida son vectores de caracteres que indican si los rodamientos a que hacen referencia están dañados o no.

8.14 HHT_SPM

Esta función necesita como entrada la matriz de salida del programa *emd*, la frecuencia de muestreo F_s y la frecuencia de giro f . Se aplica la transformada de Hilbert a cada una de las IMF, se calcula el valor normalizado para todas las frecuencias y se realiza la representación temporal de las IMF así como su espectro en frecuencias con valores normalizados y con una línea de referencia en 35 dB. Las salidas son una matriz con los resultados obtenidos para cada IMF y el vector del eje de frecuencias.

```
function [B,freq]=hht_spm(A,Fs,f)
```

8.15 TEST_HHT_SPM

Este script aplica la descomposición modal empírica y posteriormente la función *hht_spm* para una muestra representativa de señales. Es prácticamente idéntico al script *TEST_HHT*.

8.16 HHT_MY_SPM

Esta función devuelve un carácter que indica si el rodamiento está dañado o no. Para ello estudia las 4 primeras IMF. Devuelve también la frecuencia a la que se encuentra el máximo del espectro de frecuencias. Las entradas son la matriz salida del programa *emd*, la frecuencia de muestreo y la velocidad de giro del rodamiento.

```
function [def,where]=hht_my_spm(A,Fs,rev)
```

8.17 HHT_MY_SPM_TEST

Este script aplica la función anterior a todas las señales disponibles con el objetivo de determinar si éstas están dañadas o no y el tipo de defecto que tienen.

Todos estos scripts podrían haberse hecho de esta manera, ya que se escriben menos líneas de código, pero también es cierto que la capacidad de cálculo necesaria es mayor, porque estamos cargando todas las señales en una matriz tetradimensional que posteriormente será recorrida y esto exige una mayor capacidad de cálculo.

No se puede cargar todos los datos en una sola matriz porque el ordenador no tiene memoria suficiente, por lo tanto se ha utilizado una matriz para cada tipo de rodamiento.

8.18 SPM_CYCLE_SPINNING

Muy parecido al *mean_cs*, pero en este caso en vez de representar los espectros en frecuencia obtenidos, se calcula su valor dB y se comprueba si hay puntos por encima de los 35 dB, aportando como salida un carácter que indica si hay defecto o no y otro que indica donde se encuentra dicho defecto. El programa utiliza la función *maximo*.

```
function [def,where]=spm_cycle_spinning(x,rev)
```




8.19 SPM_CYCLE_SPINNING_TEST

Este script aplica la función anterior a todas las señales disponibles con el objetivo de determinar si éstas están dañadas o no y el tipo de defecto que tienen.

En este caso no se ha aplicado la idea de cargar las señales en una matriz, por lo tanto la longitud del script es mucho mayor.

8.20 SPM_CS

Esta función calcula la media de todas las señales de detalle de cada nivel después del cycle_spinning, calcula el valor normalizado y lo representa en función de la frecuencia. La salida es una matriz *a* cuyas columnas son la media correspondiente a cada nivel de descomposición.

```
function a=spm_cs(x,rev)
```

8.21 SPM_CS_TEST

Aplica una vez más la función anterior a una serie de señales, es un script muy parecido al MEAN_CS_TEST.

8.22 MAXIMO

Esta función devuelve un caracter indicando el posible defecto presente en el rodamiento, las entradas son la frecuencia a la que se presenta el máximo y la velocidad de giro. Como ya se indicó anteriormente, se utiliza durante la función *spm_cycle_spinning*

```
function where=maximo(frecuencia,rev)
```